Potencial Solar dos Edifícios Públicos da RAM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marco Menezes Leça

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA

junho | 2014

Potencial Solar dos Edifícios Públicos da RAM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marco Menezes Leça
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA

ORIENTADOR
Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias

Universidade da Madeira

Centro de Competências em Ciências Exatas e da Engenharia

POTENCIAL SOLAR DOS EDIFÍCIOS PÚBLICOS DA REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Marco Menezes Leça

Dissertação para obtenção do grau de Mestre

Orientador: Prof. Doutor
Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Manuel Rosmaninho Morgado Ferrão Dias, pela sua forma de trabalho, empenho, dedicação, conselhos, disponibilidade e pela liberdade de expressão e escolha que me permitiu ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Seguidamente, gostaria de agradecer às seguintes entidades: Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente (DROTA), em especial, ao Eng.º Luís Antunes pela sua disponibilidade e colaboração na identificação dos edifícios públicos; Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), em particular, ao Eng.º Carlos Magro, pelo seu contributo, interesse, disponibilidade e ajuda na informação sobre as diferentes tecnologias solares; e aos estabelecimentos escolares da Região Autónoma da Madeira (RAM), nomeadamente, Escola Básica e Secundária da Calheta (EBSC) e Escola Básica dos 2º e 3º Ciclos dos Louros.

Agradeço também às empresas regionais de energias renováveis Intelsol e AMV-Renováveis, ambas sediadas no concelho da Calheta, pela sua disponibilidade de atendimento e reuniões para discussão das melhores soluções possíveis.

À minha família, em especial, os meus pais, irmã, tia Doroteia e avô pelo apoio total, estímulo e incentivo, tanto na realização desta tese, como ao longo de todo o curso superior.

À minha namorada Christina Vieira, pelo apoio incondicional, compreensão, paciência e predisposição para ajudar sempre que necessário.

Um muito obrigado aos meus grandes amigos e colegas, pelo bem-estar proporcionado, apoio, paciência e incentivo demonstrado ao longo do meu percurso académico.

Resumo

As energias renováveis têm sido cada vez mais a alternativa encontrada para substituir o uso dos combustíveis fósseis na produção de energia. Neste contexto, surge a oportunidade de realizar um estudo sobre o "Potencial Solar dos Edifícios Públicos da RAM" como objeto de trabalho desta tese de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Redes de Energia (METRE). Pretende-se que este estudo sirva para impulsionar o investimento nesta área por parte dos decisores regionais, dotando-os de um estudo do potencial de produção de energia solar nos edifícios públicos da RAM.

Através de estudos desenvolvidos pelo LREC, ERAMAC - Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia, e do *Joint Research Centre (JRC*), contendo dados do Instituto Meteorológico (IM), da Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira (AREAM), do LREC e do *World Meteorological Organization (WMO)*, avaliou-se a radiação solar na RAM, através de tabelas e mapas de radiação solar, contendo a radiação solar global diária média mensal e média anual.

Posteriormente fez-se uma análise da oferta do mercado atual de painéis fotovoltaicos (PV) em termos de eficiência, distinguindo as várias gerações de tipos de painéis introduzidos no mercado.

Foram realizadas várias pesquisas em diversas áreas de energias renováveis e tecnologias existentes para, posteriormente, se realizar uma seleção e introspeção da informação essencial ao tema de forma a definir-se a fase de desenvolvimento desta tese.

Com o auxílio da ferramenta computacional Quantum GIS, foram identificados alguns edifícios públicos com a dimensão e exposição solar apropriada para a colocação de sistemas solares nos mesmos.

De seguida, foi realizado uma análise do preço pago/recebido por kWh consumido/produzido e cinco casos de estudos, nos quais foram focados os diferentes impactos de várias tecnologias solares nos prédios públicos da RAM, avaliando financeiramente os custos e retorno do investimento na aplicação destas tecnologias em cada caso, através das ferramentas computacionais, SolTerm e RETScreen.

Finalmente retirou-se as respetivas conclusões acerca das opções tomadas, por exemplo, na escolha das tecnologias solares a implementar, os seus custos, o retorno do investimento, preços dos painéis fotovoltaicos, entre outros.

Palavras-Chave: RAM, Radiação Solar, Edifícios Públicos, Painéis Fotovoltaicos, Tecnologias Solares.

Abstract

Renewable energies have been increasingly an alternative to replace the use of fossil fuels to produce energy. In this context, the opportunity arises to conduct a study on the "Solar Potential of Public Buildings in Madeira" as the object of study of this master's degree thesis in Telecommunications and Energy Networks Engineering. It is intended that this study will serve to boost investment in renewable energy by the regional authorities, providing them with a study of the potential of solar energy production in public buildings of Madeira.

Using several studies developed by LREC, ERAMAC - Maximizing the Penetration of Renewable Energy and Rational Use of Energy in the Islands of Macaronesia, and *JRC*, containing data from the Meteorological Institute (IM), Regional Agency for Energy and Environment of the Autonomous Region of Madeira, LREC and WMO, we evaluated the solar radiation in Madeira, using tables and solar radiation maps, containing the daily global solar radiation average and annual average.

Subsequently, an analysis of the current supply of photovoltaic panels (PV) on the market in terms of efficiency was carried out, distinguishing the various generations of panel types introduced on the market.

Then, several researches were conducted in many areas of renewable energy and existing technologies in order to perform a selection of critical information and insight on the subject so as to set up the development phase of this thesis.

With a software tool called Quantum GIS, some public buildings were identified with the appropriate size and sun exposure for the placement of solar systems on them.

Afterwards, an analysis to the price paid/received by each kWh consumed/produced and five case studies were done, which were focused on the different impacts of various solar technologies in public buildings of Madeira, assessing financial costs and return on investment on the application of these technologies in each case, through the use software tools, SolTerm and RETScreen.

Finally the respective conclusions about the options were made, such as the choice of implementing solar technologies, their costs, return on investment, efficiencies, the price of photovoltaic panels, among others.

Keywords: Madeira, Solar Radiation, Public Buildings, Photovoltaic Panels, Solar Technologies.

Índice

Índice de figuras

Índice de Tabelas

Acrónimos

AC (Alternating current) – Corrente Alternada

AREAM - Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira

BTE – Baixa Tensão Especial

BTN – Baixa Tensão Normal

CPV (Concentrated Photovoltaics) – Tecnologias de Concentração Solar

DC (Direct current) – Corrente Contínua

DGGE - Direção Geral de Energia e Geologia

DRAC - Direção Regional dos Assuntos Culturais

DROTA - Direção Regional de Ordenamento do Território e Ambiente

DRQP - Direção Regional de Qualificação Profissional

EBSC – Escola Básica e Secundária da Calheta

EEM – Empresa de Eletricidade da Madeira

ENE – Estratégia Nacional para a Energia

EPDM – Borracha de Etileno-Propileno-Dieno

ERAMAC - Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

ESCO (Energy Service Company) – Empresa de Serviços Energéticos

EUMETSAT - *European Organisation for the Exploitation of Satellites*

FDTI - Fundação para a Divulgação das Tecnologias de Informática

FV (Photovoltaic System) – Sistemas Fotovoltaicos

GEE – Gases de Efeitos de Estufa

GPS (Global Positioning System) – Sistema de Posicionamento Global

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

IGeoE - Instituto Geográfico do Exército

IM – Instituto Meteorológico

IMI - Imposto Municipal Sobre Imóveis

INE – Instituto Nacional de Estatística

INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia e Inovação

JRC (Joint Research Centre) - Centro Comum de Investigação

LCD (Liquid Crystal Display) – Ecrã de Cristais Líquidos

LREC – Laboratório Regional de Engenharia Civil

MA – Massa de Ar

MDT – Modelo Digital Terrestre

METRE – Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Redes de Energia

MPP (Maximum Power Point) – Ponto de Máxima Potência

NASA (National Aeronautics and Space Administration) - Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço

PECVD - *Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition*

POI (Points Of Interest) – Pontos de Interesse

PV (Photovoltaics Panels) – Painéis Fotovoltaicos

QGIS – Quantum GIS Lisboa

RAM – Região Autónoma da Madeira

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

TIR – Taxa Interna de Retorno

UE (European Union) – União Europeia

UV – Raios Ultravioleta

WGS (World Geodetic System) - Sistema Geodésico Mundial

WMO (World Meteorological Organization) – Organização Meteorológica Mundial

Capítulo 1 – Introdução

Hoje em dia existe uma grande preocupação a nível mundial devido à crescente dependência dos combustíveis fósseis e às consequências provocadas no meio ambiente pelo consumo dos mesmos. Neste contexto surgem outras alternativas, nomeadamente as energias renováveis, sendo os seus recursos renováveis (naturalmente abastecidos), limpos e ilimitados.

Atualmente verifica-se um aumento do consumo mundial de energia, sendo que, as energias renováveis representam 19% do consumo total de energia [2]. Ao nível de investimento na área de energias renováveis, surge o Japão com o maior investimento alguma vez realizado, seguido dos Estados Unidos da América e o Brasil, sendo este último, o que possui um dos maiores programas de energia renovável no mundo, envolvendo a produção de álcool a partir da cana-de-açúcar.

Em termos energéticos, a RAM tem uma elevada dependência em relação aos combustíveis fósseis, apesar desta ter sido atenuada com os recentes pequenos investimentos ao nível de energias renováveis, mais concretamente nas áreas das energias fotovoltaica e eólica. Este esforço, apesar de pequeno, é de louvar mas encontra-se ainda numa fase embrionária.

Baseando-se nos fundamentos anteriormente mencionados e com o propósito de impulsionar o desenvolvimento de energias renováveis, fornecendo aos decisores regionais um estudo do potencial de produção fotovoltaica nos edifícios públicos da RAM, é então proposto este trabalho como dissertação de fim de curso do METRE.

1.1 Motivação

A área das energias renováveis é uma área que a nível mundial tem sido uma aposta forte para diminuir a dependência do petróleo, devido à poluição causada pelo consumo do mesmo e sobretudo o preço atualmente praticado.

Como a tecnologia inerente às energias renováveis tem evoluído de forma rápida ultimamente, houve uma melhoria dos níveis de eficiência dos sistemas de produção de energia renovável e redução considerável de custos destes sistemas. Com isto em mente, apresenta-se neste trabalho um estudo do potencial solar dos edifícios públicos da RAM, determinando através dos resultados obtidos se um investimento forte na área da energia solar é rentável ou não, sendo que, para isso, são analisados os seus retornos financeiros e impactos ambientais.

A nível de rendimentos, a Ilha da Madeira é uma região autónoma que vive essencialmente do Turismo, representando este uma grande fatia dos proveitos económicos, publicitando e tornando-se atrativa pelas suas belas paisagens, climas e natureza. Logo, torna-se imperativo proteger estes fatores que tanto rendimento trazem à Região, sendo a via das energias renováveis um caminho viável para tornar a mesma mais autonomamente sustentável a nível energético, mais “verde” e num lugar melhor para as gerações vindouras.

As diversas ajudas provenientes da União Europeia (UE), como o apoio na área de investigação de tecnologias derivadas das energias renováveis, apoios monetários para investimentos, ou até mesmo, troca de informações e tecnologias, estimulam o mercado, sob a forma de mais e maiores investimentos nesta área. Estas ajudas servem para atingir as metas propostas pela UE até 2020, surgindo então, como motivação extra para a escolha do tema desta tese.

1.2 Objetivos

O objetivo principal pretendido com este projeto é o desenvolvimento de um estudo teórico-prático que, impulsione o investimento e desenvolvimento do potencial de produção de energia

fotovoltaica nos edifícios públicos por parte dos decisores regionais. Mais especificamente, os objetivos passaram por:

- Avaliação da radiação solar na RAM;
- Análise da oferta de PV em termos de eficiência;
- Estudo da evolução dos valores pagos por kWh produzido em sistemas de PV;
- Estudo da evolução do preço por kWh consumido pelos clientes da Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM);
- Estudo da evolução dos preços das instalações de PV;
- Identificação dos edifícios de dimensão e exposição solar apropriada;
- Projeção dos custos e período de retorno das instalações fotovoltaicas analisadas;

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está organizada da seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentados todos os conceitos e ferramentas fundamentais, usados na conceção deste trabalho, abordando as energias renováveis de uma forma generalizada mas focando principalmente os sistemas fotovoltaicos (FV) e as suas alternativas. É apresentada uma análise sobre a disponibilidade de radiação solar na RAM, baseada em estudos já realizados e comprovados, verificando se a mesma é ou não propícia para a instalação das tecnologias solares selecionadas. Neste capítulo é realizada ainda uma análise às eficiências dos PV existentes no mercado, assim como, uma breve introdução aos programas de simulação empregues na obtenção dos resultados.

No capítulo 3, são identificados alguns edifícios públicos que possuem uma exposição e dimensão apropriada para a instalação das tecnologias solares escolhidas previamente.

No capítulo 4 abordar-se-á a oferta no mercado e o retorno de investimento de instalações fotovoltaicas para microprodução, em termos de preço e anos, respetivamente, assim como, os valores pagos pela eletricidade consumida (EEM) e produzida por FV.

Posteriormente, no capítulo 5, são apresentados cinco casos de estudo, nos quais são considerados os diferentes impactos das aplicações das tecnologias solares selecionadas nos prédios públicos da RAM, avaliando financeiramente os custos e retorno do investimento na aplicação destas tecnologias em cada caso, emissões de gases de efeitos de estufa (GEE), reduções na balança comercial da RAM, entre outras.

Finalmente, no capítulo 6 são abordadas as principais contribuições do projeto, as vantagens e desvantagens das soluções apresentadas, as possíveis implementações futuras e algumas reflexões/conclusões sobre o trabalho realizado.

Capítulo 2 – Estado de arte

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma perspetiva geral sobre as energias renováveis na UE, sendo de seguida exposto um pequeno estudo sobre a situação das energias renováveis em Portugal e na RAM.

Logo após, introduzir-se-á a energia solar no contexto desta tese, abordando a sua importância enquanto fonte renovável de produção de energia alternativa aos combustíveis fósseis e a sua disponibilidade em Portugal e, mais especificamente, na RAM.

De seguida são abordados os diferentes PV existentes no mercado, em termos de eficiência e evolução.

Posteriormente, são aprofundados o tema dos FV e Térmicos, sendo realizado uma análise comparativa entre dois tipos distintos de tecnologias térmicas.

Finalmente é feita uma breve apresentação dos programas de simulação de Sistemas Renováveis e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizados para a realização deste trabalho, nomeadamente o funcionamento dos FV, componentes, vantagens/desvantagens, implementação e análise da geografia local para determinar os melhores locais de instalação dos sistemas solares, fundamentando o porquê do uso e escolha dos mesmos, seguida de algumas conclusões.

2.2 Energias renováveis

As energias renováveis são atualmente o pilar da energia alternativa aos combustíveis fósseis devido principalmente à energia produzida ser considerada “limpa” e proveniente dos recursos ilimitados disponíveis no nosso planeta Terra, como o sol, vento, chuva, marés e a energia geotérmica.

Existem muitos sistemas de energia “limpa”, nomeadamente, energia eólica, energia hídrica, energia solar, energia maremotriz, energia ondomotriz, energia geotérmica e a energia do hidrogénio. Como tal, quando se fala em energias renováveis, refere-se a um grande número de tecnologias que disponibilizam serviços de energia, sob a forma de eletricidade, iluminação, aquecimento, arrefecimento e soluções de transporte, de maneira sustentável.

No contexto da UE foram estabelecidas metas de introdução de energias renováveis no consumo de energia elétrica, para cumprir até 2020, sendo as mesmas:

- Reduzir em 20%, no mínimo, as emissões de GEE na UE, em relação aos níveis de 1990;
- Aumentar para 20% a parte da energia proveniente de fontes renováveis no consumo da UE;
- Reduzir em 20% o consumo de energia primária (energia elétrica derivada do uso de combustíveis

Na figura 1 é apresentado um gráfico do relatório publicado pelo Ministério da Economia de Portugal, no qual se observam as metas traçadas, o que ainda falta cumprir e a percentagem de conclusão já obtida por cada estado-membro da UE. Este gráfico refere que Portugal está em quarto lugar na lista dos estados-membros da EU mais avançados no cumprimento das suas metas de produção de energia elétrica (79%) através de fontes renováveis até 2020.
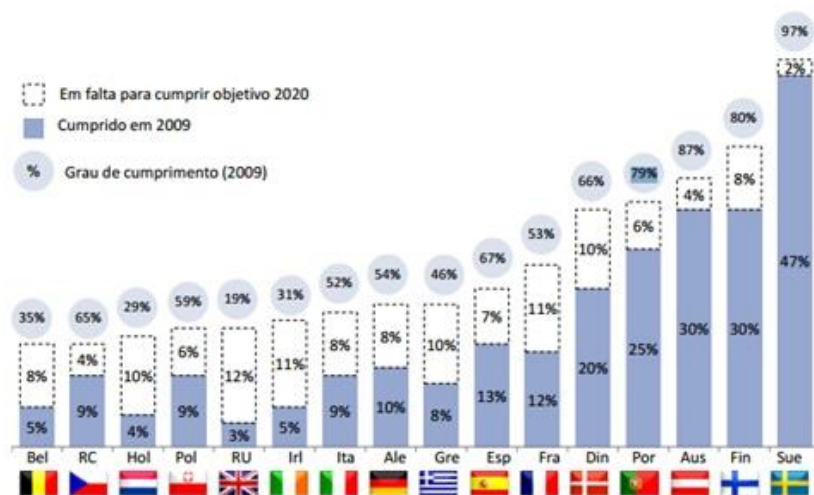
Figura 1 - Metas de introdução de energias renováveis no consumo de energia total na UE [1].

A tabela 1 apresenta a relação entre as tecnologias das fontes de energia renováveis e as suas possíveis utilizações.

Tabela 1 - Relação entre tecnologias de fontes renováveis [2].

	Eletricidade	Transporte	Arrefecimento e aquecimento
Eólico	Em terra (*Onshore*)		
	No mar (*Offshore*)		
Hídrico	Mini-hídrico (<10MW)		
	Grande hídrico (>10MW)		
Solar	Fotovoltaico		Solar térmico
	Solar termoelétrico de concentração		
Oceânico	Ondas		
	Marés		
Geotérmico	Convencional		Uso direto
	Sistemas geotérmicos avançados		Bombas de calor geotérmicas
Bioenergia	Biomassa	Bioetanol	Biomassa
	Biogás	Biodiesel	Biogás
		Biogás	

Atualmente existe um grande número de tecnologias associadas às energias renováveis disponíveis, com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e comercial, sendo as mais relevantes as tecnologias hídrica, solar e eólica.

A introdução das energias renováveis na rede elétrica tem inúmeras vantagens, como por exemplo:

- Redução do consumo de combustíveis fósseis e dos impactos ambientais;
- Diminuição da dependência energética exterior (a outros países);
- Aumento da segurança no aprovisionamento energético.

As apostas e políticas de investimento nas energias renováveis, por parte da EU, devem ser prosseguidas nos anos vindouros, muito por força dos excelentes resultados obtidos até ao momento, na área da energia "limpa e ilimitada" e tendo para já como objetivo a curto/longo prazo, metas muito ambiciosas definidas para o ano de 2020. Estas metas foram anunciadas na Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020), em que as renováveis devem representar 60% da energia elétrica produzida em 2020 e 31% de toda a energia final consumida.

O sector das renováveis que terá maior destaque, aposta e responsabilidade pelo cumprimento desta meta será a energia eólica, com uma previsão de 8.500 MW instalados até 2020 [2]. A respeito da energia hídrica, os objetivos apontam para que a potência hídrica atinja valores próximos de 8.600 MW até 2020. A nível da energia fotovoltaica, o objetivo da ENE 2020 é atingir 1.500 MW também até 2020, prevendo-se para tal, lançar um programa de miniprodução destinado a projetos com potências de 250 kW.

2.3 Energias renováveis em Portugal e na RAM

Portugal é considerado muito dependente de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica, observando-se um aumento do consumo de combustíveis fósseis entre 1990-2005, passando dos 82% para 87%. Com estes valores em mente, foram introduzidas políticas de promoção e incentivo à redução de emissões de gases poluentes, assim como um ousado programa de integração de fontes de energia renovável na rede elétrica, retornando-se assim aos valores de 1990 (82%) em finais de 2008 [2].

Hoje em dia, contam-se fontes energéticas nos mais diversos ramos, estando divididas em: 53% para energias que utilizam combustíveis fósseis (24% gás natural, 21% carvão, 2% fuel e 6% de cogeração térmica), 28% para a geração de energia a partir de fontes renováveis (13% de hídrica, 11% eólica e 4% de cogeração renovável), pertencendo os restantes 19% à importação. Prevê-se que, a utilização, assim como a dependência, de combustíveis fósseis continue com a tendência decrescente, beneficiando a componente renovável [2].

Já a produção de energia elétrica a nível regional provém maioritariamente das centrais térmicas a *diesel*, com 74,5% da energia total consumida na RAM, seguido da energia eólica com 9,7%, a energia hídrica situando-se à volta dos 9%, a energia fotovoltaica com 3,8% e finalmente, a energia proveniente dos resíduos sólidos urbanos com 3% [3].

Durante o ano 2013, 58,3% da energia total consumida em Portugal proveio de fontes de energias renováveis, representando um aumento de 20% em relação a 2012. Este aumento da produção de energia limpa permitiu reduzir a quantidade de eletricidade importada em 280% [4].

No contexto regional encontram-se muitos bons exemplos de aplicação das energias renováveis, com um tremendo sucesso em vários pontos, nomeadamente a nível das energias eólica, hídrica e fotovoltaica, estando estas por ordem decrescente, da maior para a menor energia produzida, proveniente da tecnologia energética.

A energia hídrica ocupa um lugar de destaque, não só a nível continental, mas a nível regional visto ser uma das poucas energias renováveis em que há a opção de armazenamento de energia. Esta opção deve-se ao uso de barragens para armazenar a água, utilizando a sua energia potencial para produzir mais ou menos energia consoante as necessidades do momento atual. Este fator é importante porque ao comparar-se esta energia com outra renovável, como solar ou até mesmo eólica, estas dependem fortemente das condições climatéricas para a produção de energia. A central elétrica dos Socorridos, pertencente à EEM, é um exemplo de armazenamento desta "energia" sob a forma de depósitos de água.

A energia elétrica proveniente da energia do vento teve um crescimento espantoso, passando de valores de 114 MW em 2001 para 2.600 MW em finais de 2008, representando um aumento extraordinário de 2281%.

Já ao nível da energia solar verificou-se um aumento do investimento nesta área, no intervalo de 2007 a 2009, graças às muitas regalias oferecidas pelo Governo dessa altura. Mas, com a conjuntura atual, esse aumento verificado no passado diminuiu bastante devido às condições e

benefícios a nível fiscal terem diminuído ou até mesmo extinguindo-se, sendo que, a principal razão para este abrandamento, ou até mesmo quase estagnação do investimento nesta área, deve-se especificamente ao facto do valor pago por kWh produzido ter diminuído quase 2/3 do valor pago inicialmente (relativamente a 2008).

Com todos estes fatores a prejudicarem muito fortemente o investimento na área da energia solar, o Governo atual teve que arranjar outras formas de incentivar ao investimento. Para tal, criaram-se outras regalias e mudou-se a legislação aplicada ao conceito das energias renováveis, ao nível das instalações fotovoltaicas, como por exemplo, a introdução do autoconsumo, programas de financiamento a nível europeu e a introdução do contador de eletricidade bidirecional.

Foi criado ainda um programa de financiamento europeu à investigação, inovação e investimento em todas as áreas científicas, estando entre elas a energia, sendo denominado Horizonte 2020 e estando ao seu dispor 70 mil milhões de euros, estando este valor ainda sujeito a negociações no âmbito do Orçamento Global Europeu [5].

2.4 Energia solar

A energia irradiada pelo Sol, para a atmosfera terrestre, é praticamente constante. Esta energia irradiada ou radiação solar é vista como a constante solar (E_O = 1.367 W/m^2) relativa a uma área de 1 m^2. Esta constante tem pequenas alterações, provocadas pela variação da atividade solar (explosões solares) e com a excentricidade da órbita da Terra. Estas alterações que se detetam na gama dos UV são inferiores a 5% logo não são significativas para as aplicações de tecnologia solar.

A nível europeu, Portugal surge como o país com mais exposição solar, registando uma média anual de aproximadamente 7 horas/dia com uma receção superior a 1.200W/m^2. A energia solar diária que chega a Portugal é em média 430.000 GWh, sendo o equivalente à energia que o país consome em 1000 dias, aproximadamente [6].

A radiação solar possui duas componentes, sendo: a radiação direta (E_{dir}), proveniente do Sol, que alcança a superfície terrestre sem qualquer mudança de direção e, a radiação difusa (E_{dif}), que atinge os olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. Esta radiação também inclui a radiação refletida pela superfície terrestre, como observado na figura 2 [7].
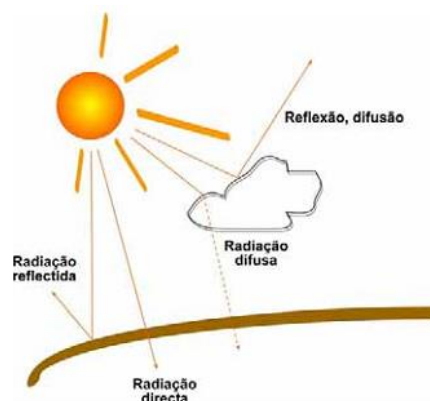
Figura 2 - Radiação solar global e as suas componentes [7].

A soma destas duas componentes, nomeadamente, as radiações direta e difusa, equivale à radiação solar global no plano horizontal ($E_G = E_{dir} + E_{dif}$).

Da figura 2 verifica-se que quando o Sol encontra-se verticalmente acima de uma determinada área, a radiação solar efetua o percurso mais pequeno através da atmosfera, enquanto que, quando o Sol se posiciona num ângulo mais baixo, por exemplo, no horizonte, a radiação solar efetua um caminho mais longo, sofrendo uma maior absorção e difusão logo disponibilizando uma menor intensidade de radiação solar [7].

Os fatores que influenciam a intensidade de radiação, para além da distância como atrás mencionado, são:

- Massa de Ar (fator MA): indica um múltiplo do percurso da radiação solar na atmosfera para um local exato, num determinado instante. Usando esta definição, com o Sol localizado verticalmente (Υ_S = 90°), obtém-se um valor de MA = 1;
- Condições astronómicas: afetam a disponibilidade de radiação solar;
- Nebulosidade ou estado do céu: a energia irradiada, tal como a quantidade de radiação difusa e direta, variam com a quantidade de nuvens [7].

A radiação solar no espaço sem influência da atmosfera terrestre é considerada tendo um espetro de MA = 0. Ao passar pela atmosfera terrestre a intensidade da radiação solar é atenuada, devido a:

- Reflexão causada pela atmosfera;
- Absorção através de moléculas na atmosfera (O_3, H_2O, O_2, CO_2);
- Difusão Rayleigh (difusão de moléculas de ar);
- Difusão Mie (ocorre quando o diâmetro das partículas da atmosfera é igual ao comprimento de onda (λ) da radiação solar incidente. Por exemplo, vapor de água e poeiras) [7].

A tabela 2 mostra a dependência da irradiação em relação ao ângulo de elevação Υ_S. A diminuição do ângulo de elevação do Sol faz com que aumente a absorção e difusão. É importante mencionar que, a difusão Mie depende da localização, sendo esta muito maior em áreas industriais.

Tabela 2 - Fatores de variação da irradiação [7].

Υ_S (°)	MA	Absorção (%)	Difusão Rayleigh (%)	Difusão Mie (%)	Atenuação Total (%)
90	1,00	8,7	9,4	0 ... 25,6	17,3 ... 38,5
60	1,15	9,2	10,5	0,7 ... 29,5	19,4 ... 42,8
30	2,00	11,2	16,3	4,1 ... 44,9	28,8 ... 59,1
10	5,76	16,2	31,9	15,4 ... 74,3	51,8 ... 85,4
5	11,5	19,5	42,5	24,6 ... 86,5	65,1 ... 93,8

O valor do somatório da média anual da irradiação solar global é um valor muito importante para o dimensionamento de sistemas solares. Durante o ano, a irradiação solar global sofre variações ao longo do dia, sendo esta variação muito influenciada pela radiação direta. Para além da irradiação solar global, o número de horas de luz (insolação) é também muito frequentemente utilizado para o dimensionamento de projetos de sistemas solares.

O fator orientação tem influência no processo de dimensionamento, sendo que, para diferentes ângulos de incidência do Sol ao longo do ano, a uma determinada latitude, existe um valor máximo de radiação solar produzida que poderá ser obtido se a superfície recetora estiver inclinada a um determinado ângulo. O ângulo de inclinação ótimo, para os meses de Inverno (menor radiação) é maior que no Verão, devido à menor altura solar. Assim, obtém-se dois tipos de mapas de radiação: mapas de radiação solar no plano horizontal e os mapas de radiação solar no plano ótimo.

Então, para o dimensionamento de sistemas de tecnologia solar utilizam-se os ângulos da tabela 3.

Tabela 3 - Ângulos utilizados em tecnologia solar [7].

Altura Solar (Υ_S)	Horizonte = 0°	Zénite = 90°	-------------------
Azimute Solar (α_S)	Sul = 0°	Este = -90°	Oeste = +90°
Inclinação Superficial (β)	Horizontal = 0°	Vertical = 90°	-------------------
Azimute Superficial (α)	Sul = 0°	Este = -90°	Oeste = +90°

Na figura 3 está uma descrição visual dos ângulos utilizados na tecnologia solar.
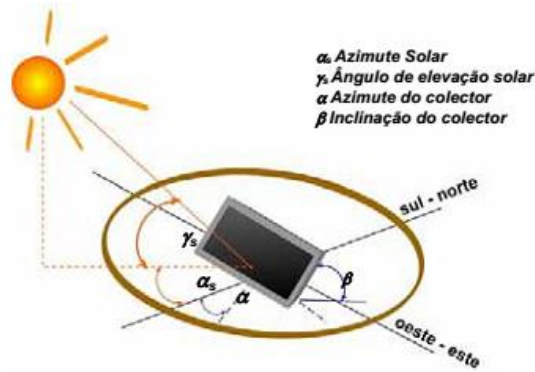
Figura 3 - Descrição dos ângulos para a tecnologia solar [7].

Nas tecnologias solares, é frequentemente colocada a questão da influência do alinhamento e inclinação do telhado/sistema solar na insolação (número de horas de brilho solar), de forma a rentabilizar ao máximo o aproveitamento da energia solar. Assim, apesar destes fatores serem importantes, estes não são críticos.

A título de curiosidade, no processo de medição da radiação solar numa superfície horizontal, são utilizados normalmente dispositivos de medida designados de piranómetros.

2.4.1 Avaliação da radiação solar na RAM

A exposição à radiação solar de uma determinada área é fundamental quando se pretende estudar a implementação de qualquer tecnologia solar. Este parâmetro é importante não só pela possibilidade de verificar qual o melhor local para instalação de um conjunto de PV ou um painel térmico mas também pelo facto de se poder definir a melhor configuração de instalação, ou seja, direção da instalação, azimute e outros parâmetros. Esta configuração visa sempre a potência máxima que um gerador fotovoltaico consegue produzir.

A potência máxima de um gerador solar (módulo ou painel) varia consoante as condições ambientais, designadamente com a temperatura e a radiação solar incidente, tendo esta uma influência direta na intensidade de tensão e corrente nos terminais dos PV. O regulador de potência é responsável por posicionar o gerador fotovoltaico no ponto de operação correspondente à potência máxima de funcionamento. Para tal, durante um determinado período de tempo e consoante as condições ambientais, o regulador de potência percorre a curva característica corrente-tensão do gerador fotovoltaico, determinando o Ponto de Máxima Potência (MPP). A eficiência típica dos sistemas reguladores de potência, segundo a literatura especializada neste tema, varia entre 90% e 96%.

Neste capítulo são analisados e interpretados diversos estudos patentes no livro “Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira”, no projeto realizado pelo ERAMAC - Avaliação do potencial energético solar na RAM, e nos mapas de radiação solar global nos planos horizontal e inclinado ótimo, provenientes do *JRC*. Estes utilizaram diversas fontes de informação com vários dados de estações meteorológicas, designadamente do Instituto de Meteorologia (IM), do LREC, da AREAM e do *WMO*.

Para que um estudo desta natureza seja considerado válido em termos estatísticos, é fundamental dispor de um certo número de estações bem distribuídas pela área geográfica em estudo, com dados registados simultaneamente durante muitos anos completos e com poucas falhas. O período dado para a realização de uma dissertação de mestrado é demasiado curto para obter uma amostra de dados própria fidedigna, para se ter em consideração na análise da avaliação solar na RAM.

Assim, foram utilizados os dados que possuem o maior conjunto de dados históricos de anos completos, de maneira a realizar um estudo o mais credível possível. Os dados meteorológicos para análise e estudo da radiação solar global da RAM cobriam os períodos de 1964 a 1972 (ERAMAC) e entre 2002 a 2005 (LREC). Estes dados meteorológicos foram fornecidos por estações de radiação solar relativamente próximas umas das outras na área geográfica em estudo (Ilha da Madeira), uma vez que, se comprovou através de vários estudos que, se as estações estiverem muito espaçadas umas das outras, provoca grandes erros ao extrapolar os dados medidos para outras regiões (sem dados de radiação solar).

Nestes estudos foi também verificado que se produziam erros consideráveis na extrapolação de dados devido à orografia do terreno, que era complexa e com grandes e bruscas variações em altitude, conforme se constata pelo relevo da Ilha da Madeira (montanhoso e com poucas planícies).

Por outro lado, com base em estudos passados, conclui-se que se cometem menos erros se a radiação solar recebida na superfície terrestre for estimada a partir de informação extraída de imagens do planeta Terra, obtidas através de satélites meteorológicos, mediante a utilização de métodos que determinam a radiação solar, tendo em consideração o albedo terrestre e das nuvens [8]. É de referir que, o albedo é uma medida relativa da quantidade de luz refletida, ocorrendo sobre superfícies de maneira direta ou difusa, ou seja, é a razão entre a radiação eletromagnética refletida e a quantidade incidente.

O método que permite estimar o valor da radiação solar de um local a partir da combinação das imagens de satélite e dos dados de radiação solar registados nas estações de superfície, é designado por procedimento de calibração ou procedimento de normalização [8]. Esta metodologia vem sendo aplicada em diversos estudos desta natureza, oferecendo resultados excelentes no domínio da radiação solar, sendo prova disso, o livro "Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira".

Através de estudos recentes verifica-se que, na RAM, a radiação solar recebida é muito diferente na zona montanhosa central e no planalto central em relação à zona costeira. A influência das montanhas na formação de elevados índices de nebulosidade (vapor de água), proporciona à zona costeira sul uma maior exposição de radiação solar, relativamente à costa norte da Ilha da Madeira.

Todos estes efeitos combinados podem induzir em erro os valores estimados de radiação solar para toda a ilha quando se considera apenas os dados de radiação solar de um número pequeno de estações [8]. Mas, o uso de imagens de satélite para a estimativa da radiação solar elimina este inconveniente, permitindo obter resultados para a radiação solar numa quadrícula de pontos geográficos, separados entre si por poucos quilómetros.

A combinação das duas fontes de informação (dados obtidos por imagens de satélite e os dados registados em terra pelas estações de superfície), relativos ao mesmo período horário, fornece uma grande fiabilidade, pelo que foi o procedimento utilizado para produzir os mapas da radiação solar da RAM do "Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira".

Na tabela 4 estão indicadas todas as cinco estações de radiação do IM localizadas na RAM, assim como as suas posições geográficas.

Tabela 4 - Estações do IM na RAM [8].

Estação	Longitude (O)	Latitude (N)	Altitude (m)
Funchal	32º 38’ 46’’	16º 53’ 27’’	58
Areeiro	32º 43’ 15’’	16º 54’ 27’’	1510
Lugar de Baixo	32º 40’ 47’’	17º 05’ 27’’	48
São Jorge	32º 49’ 54’’	16º 54’ 27’’	271
Ponta do Pargo	32º 48’ 44’’	16º 53’ 27’’	312

Na tabela 5 estão registados os vários valores de radiação global diária média mensal e média anual em Wh/m^2, para cada uma das diferentes estações da tabela 4, com base no total dos dias e com dados relativos ao período entre 2002 a 2005.

Tabela 5 - Radiação solar global diária média e média anual (unidades: $Wh/m^2.dia$) [8].

Mês	Areeiro	Funchal	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	São Jorge
Janeiro	3146	2846	2775	2754	2392
Fevereiro	3194	3419	3474	3469	2982
Março	4495	4643	4628	4428	4041
Abril	5130	4683	5044	5577	4893
Maio	6637	5691	6144	6765	5553
Junho	7470	5601	6136	7285	6175
Julho	8023	5614	6024	7232	5770
Agosto	6402	5496	5960	6496	6016
Setembro	5232	5043	5217	5155	4891
Outubro	3790	3691	3879	3862	3617
Novembro	2517	2865	2922	2753	2339
Dezembro	2305	2481	2568	2547	1972
Média Anual	**4873**	**4345**	**4570**	**4868**	**4226**

Na tabela 6 estão os valores medidos para a radiação solar diária no plano horizontal, obtidos através do sistema da *NASA Surface Meteorology and Solar Energy*, utilizando dados históricos anteriores a Março de 2008. Estes dados serviram de apoio para a interpretação final da avaliação de radiação solar na RAM.

Tabela 6 - Dados relativos ao sistema da *NASA* [9].

Mês	Humidade Relativa (%)	Radiação solar diária ($kWh/m^2.dia$)	Velocidade do vento (m/s)	Temperatura da terra (°C)	Média diária de claridade (horas)	Horas de sol/dia (horas)
Janeiro	60,6	3,14	5,0	17,5	10	5
Fevereiro	62,7	4,17	5,2	16,6	10	6
Março	66,9	5,40	5,1	16,5	11	7
Abril	68	6,72	5	17,3	11	7
Maio	71,6	7,36	4,9	19,4	13	8
Junho	73,6	8,09	4,6	22,6	14	9
Julho	72,6	8,21	3,8	25,7	14	9
Agosto	68,7	7,47	3,9	27,2	14	9
Setembro	66,2	6,11	4,2	26,8	13	8
Outubro	64	4,67	4,3	24,9	12	7
Novembro	59,2	3,40	4,5	22,3	11	6
Dezembro	57,8	2,84	4,9	19,4	10	5
Média Anual	**66**	**5,63**	**4,6**	**21,4**	**11,92**	**7,2**

A figura 4 apresenta um gráfico que demonstra a variação mensal da média diária da radiação solar, obtido através dos valores representados na tabela 5, para as diferentes estações do IM.
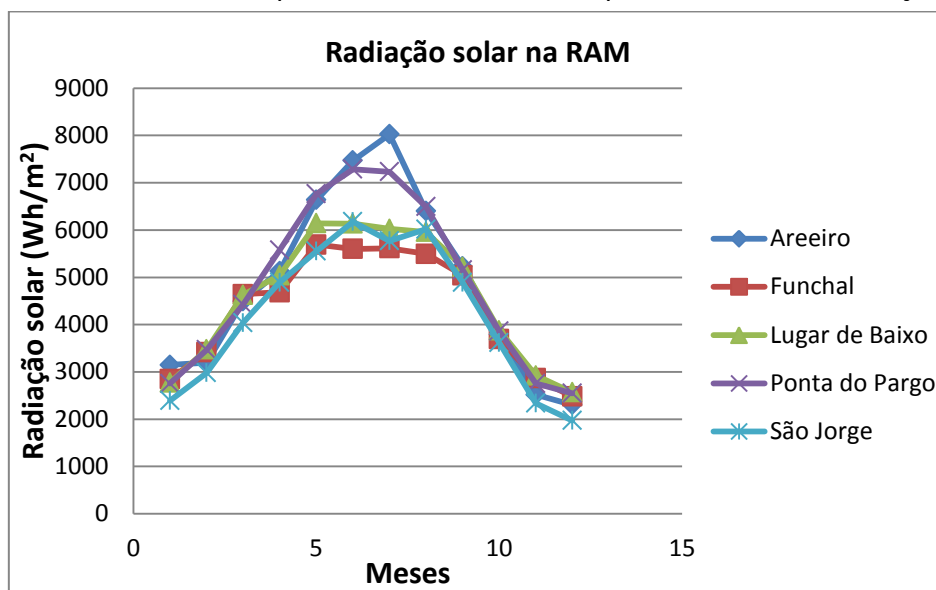
Figura 4 - Variação mensal da média diária da radiação solar na RAM

Da análise dos valores da tabela 5 e do gráfico da figura 4, conclui-se que os valores médios anuais mais altos se registaram no Areeiro (4.873 Wh/m^2.dia), seguindo-se de perto a freguesia da Ponta do Pargo (4.868 Wh/m^2.dia), do concelho da Calheta. Seguidamente, o Lugar de Baixo com cerca de 4.600 Wh/m^2.dia de radiação solar média anual, depois o Funchal (4.345 Wh/m^2.dia) e por fim a localidade de São Jorge, registando como radiação solar média anual o valor de 4.226 Wh/m^2.dia.

Verificou-se ainda que, os maiores valores registados para a radiação solar média mensal, foram para os meses de Junho e Julho, para as estações do Areeiro e da Ponta do Pargo, correspondendo este período ao início da estação do Verão, aproximadamente.

As maiores diferenças de radiação solar média mensal verificadas, entre as cinco estações do IM, ocorreram entre o intervalo de tempo de Maio a Agosto, evidenciando-se as áreas da Ponta do Pargo e Areeiro das demais. Nos meses de Setembro e Outubro, as radiações solares verificadas são muito semelhantes entre todas as estações. É importante mencionar que, o valor máximo registado para a radiação solar foi medido no Areeiro, no mês de Julho (8.023 Wh/m^2.dia).

Através do projeto ERAMAC, foi realizada outra análise mais específica à cidade do Funchal, recorrendo para tal a dados meteorológicos referentes a um período de cinco anos (1999-2003), que se encontram compilados no gráfico da figura 5, para a estação meteorológica do Funchal.
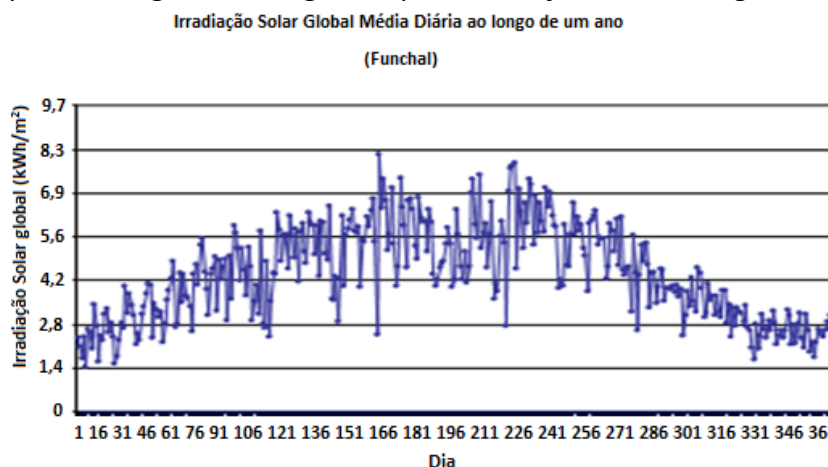
Figura 5 - Irradiação solar global média diária ao longo do ano para o concelho do Funchal [10].

Os picos irrealistas apresentados no gráfico da figura 5 (por exemplo, nos dias 164 e 219) necessitam de tratamento, assim como as lacunas existentes em alguns períodos. Estes picos são anormais porque é muito improvável obter cinco valores semelhantes para a radiação solar nos mesmos intervalos de tempo (dias 164 e 219) e durante cinco anos, muito distantes dos valores médios verificados próximos desse período. Assim, os dados que pareciam díspares foram suprimidos e, foi procedida uma intensiva interpolação de dados através do método de análise de tendências para os períodos em falta, que eram suficientemente pequenos e passíveis de serem estimados através de valores existentes, antes e depois [10].

O projeto ERAMAC contém ainda dados meteorológicos diários da Ilha da Madeira, referentes a um período de nove anos (1964 a 1972), apresentando-os de seguida no gráfico da figura 6.
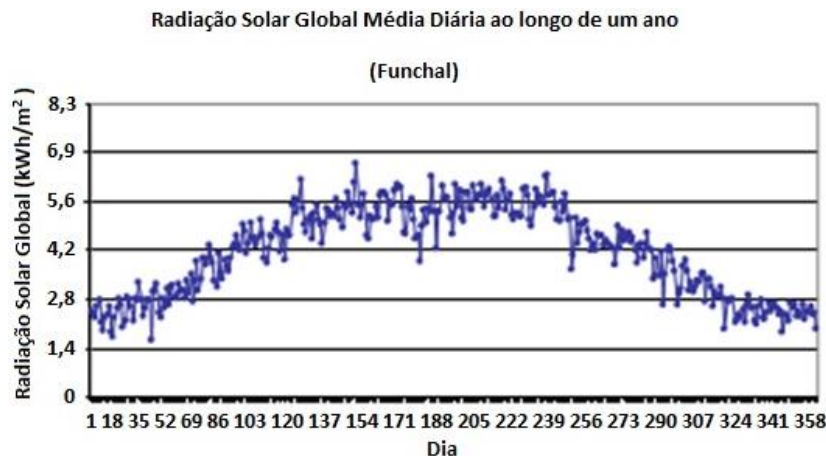
Figura 6 - Radiação solar global média diária ao longo do ano para a cidade do Funchal [10].

Os gráficos das figuras 5 e 6 apresentam um comportamento muito semelhante em ambas as curvas, bem como na ordem de grandeza do valor da radiação solar obtida, validando assim, os últimos dados (1964 a 1972) com os primeiros (1999-2003). Comprova-se então que, para os períodos anuais analisados muito distantes no tempo (várias décadas), se observa um comportamento geral estável, tanto nas gamas de radiação quanto no padrão da variação da radiação solar ao longo do ano, ou seja, confirma-se que os valores registados para a radiação sofreram poucas alterações, no intervalo de tempo de 39 anos.

É importante salientar que, os dados da radiação solar do Funchal, resultaram do projeto ERAMAC - "Avaliação do potencial energético solar na RAM", no qual foram utilizados os dados diários de radiação solar global média disponibilizados pela AREAM [10].

Para finalizar, é importante fazer um estudo dos valores das temperaturas anuais, utilizando para tal, dados referentes ao período de tempo entre 2009 a 2013. Estes valores estão demonstrados na tabela 7 e são importantes porque são um dos fatores condicionantes da produção de energia fotovoltaica, uma vez que, o rendimento do painel fotovoltaico aumenta para determinados valores de ganho de temperatura, ou seja, a eficiência está dependente da intensidade de radiação solar incidente e da diferença entre a temperatura do painel e o ambiente.

Tabela 7 - Valores médios mensais para as temperaturas dos últimos cinco anos [11] [12].

Ano	Jan	Fev	Mar	Abril	Maio	Jun	Julho	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média anual
2013	15,2	14,7	15,1	16,6	16,3	18,3	20,3	20,4	----	----	----	----	16,8
2012	14,6	13,4	14,8	15,0	18,1	20,6	21,3	22,0	21,8	19,8	16,6	15,4	17,8
2011	14,1	14,0	13,3	15,1	16,4	18,5	19,5	20,7	20,9	19,8	16,6	15,3	17,0
2010	14,8	15,1	14,7	15,4	16,6	18,1	19,8	21,4	20,6	19,4	17,4	15,6	17,4
2009	----	----	----	----	----	----	----		20,4	19,9	17,8	16,4	18,6
Média Mensal	**14,7**	**14,3**	**14,5**	**15,5**	**16,8**	**18,9**	**20,2**	**21,3**	**20,9**	**19,7**	**17,1**	**15,7**	**17,5**

Os dados da tabela 7 indicam que as temperaturas médias anuais mantiveram-se próximas da média anual total (17,5 °C), registando pequenas variações no valor de ±1,1 °C.

2.4.2 Insolação e mapas de radiação solar

A insolação é o tempo durante o qual o Sol está a descoberto, expresso em horas e décimos (unidades), estando muito dependente da nebulosidade e da insolação astronómica (insolação máxima possível no mesmo intervalo de tempo, dada pela tabela 6 através das horas do Sol, acima do horizonte). A ação conjunta dos dois fatores anteriores faz com que a insolação seja menor no Inverno do que no Verão, ou seja, no Verão a insolação é maior do que no Inverno, especialmente na RAM.

Portugal é um dos melhores países com maior número de horas de insolação, totalizando aproximadamente 2.500 horas/ano de insolação. Analisando este valor para a RAM, verifica-se que este valor é superior, rondando as 2.600 horas anuais (tabela 6).

A figura 7 mostra o mapa de radiação das Ilhas da Madeira, Porto Santo e as Desertas, presente no "Atlas da Radiação Solar na RAM".
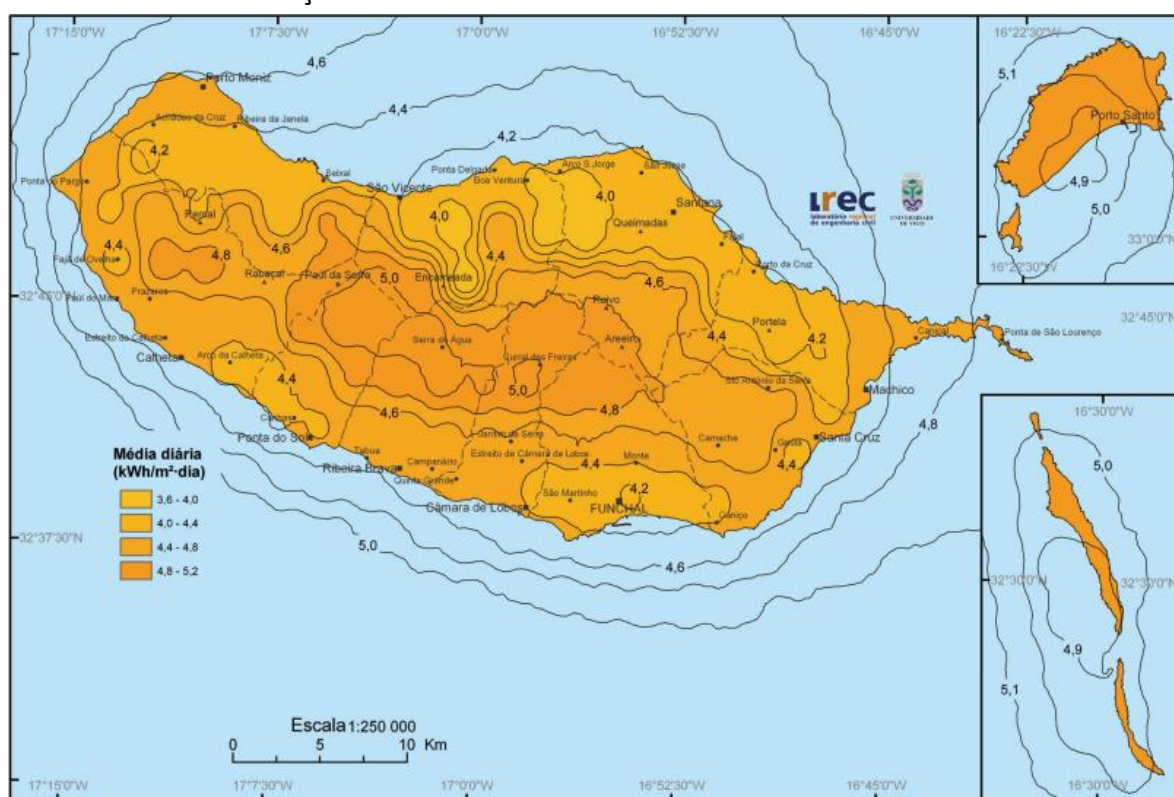
Figura 7 - Mapa de radiação solar média diária anual global no plano horizontal [8].

O mapa da figura 7 apresenta os valores médios diários anuais de radiação solar global no plano horizontal, sendo este fundamental para a quantificação da radiação solar na RAM, de forma a determinar quais as melhores zonas para a instalação de painéis fotovoltaicos. No Anexo 1 são

apresentados os mapas de radiação solar global no plano horizontal com os valores médios diários mensais, para cada um dos doze meses do ano.

Comparando os valores médios presentes no mapa de radiação solar da figura 7 com os dados da radiação solar das tabelas 5 e 6, verifica-se que os mesmos são próximos. As horas de luminosidade ou luz solar registam o valor mínimo de 10 horas/dia, um máximo de 14 horas/dia nos meses de Verão e, uma média anual de aproximadamente 12 horas/dia, sendo este considerado um valor bom para o emprego de tecnologias solares.

Comprova-se que a Ilha da Madeira é propícia para a instalação de painéis fotovoltaicos através do mapa de radiação solar média anual global, uma vez que, apresenta bons valores de radiação solar média diária (> 4 kWh/m^2.dia) [8]. Os maiores valores de radiação solar média diária foram registados no intervalo de tempo entre os meses de Março a Outubro, registando 4 kWh/m^2.dia como o valor mínimo de radiação solar obtido.

As figuras 8 e 9 são provenientes do projeto ERAMAC e apresentam os casos específicos da radiação solar média diária com menor e maior índice de radiação solar (plano horizontal), para os meses de Janeiro e Julho, respetivamente.
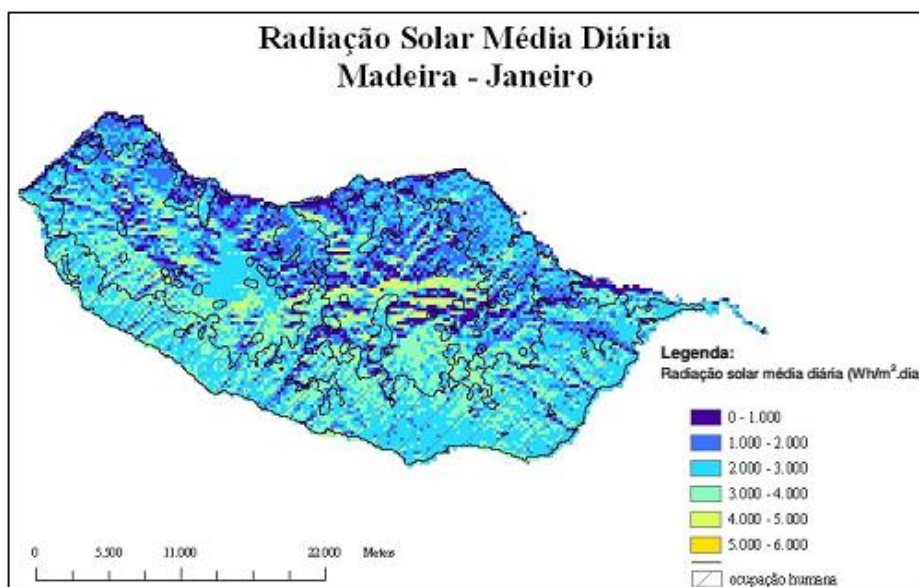
Figura 8 - Radiação solar média diária para o mês de Janeiro [10].
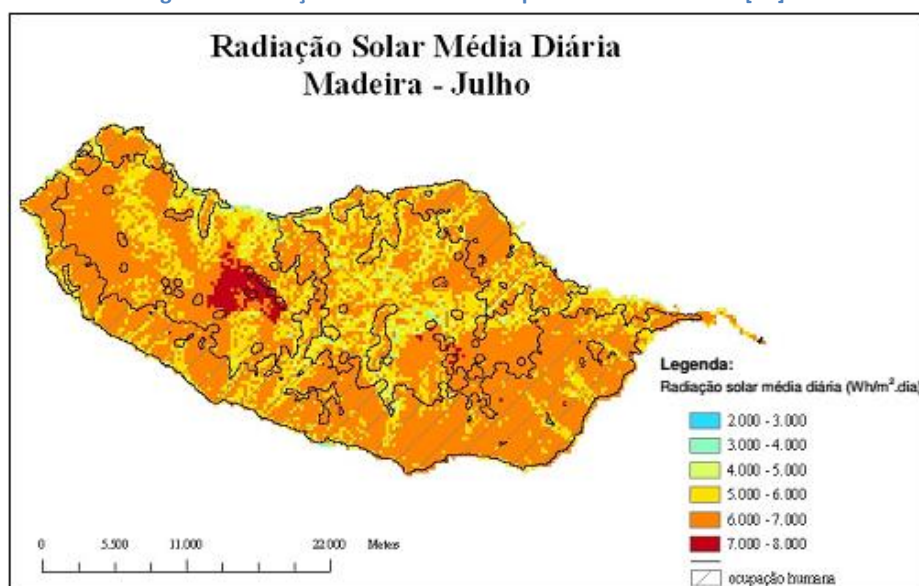
Figura 9 - Radiação solar média diária para o mês de Julho [10].

As zonas de ocupação humana encontram-se assinaladas nas figuras, permitindo a visualização global dos níveis de potencial solar associado às várias áreas da Ilha da Madeira. Estas zonas urbanas foram definidas como as áreas do território que reúnem simultaneamente as seguintes condições:

- 300 metros de raio, em redor de qualquer edificação identificada nas cartas do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE);
- Existência de pelo menos três edificações, no interior de um raio de 300 metros, em redor de cada uma delas [10].

A sinalização das zonas de ocupação humana foi efetuada com o propósito de identificar as zonas com diferentes aplicações da energia solar, ou seja, as zonas para aplicação de sistemas solares com fins domésticos, inseridos geralmente nos edifícios e as zonas desocupadas onde possivelmente poder-se-ia instalar parques solares de painéis fotovoltaicos, desde que as mesmas zonas tivessem uma boa exposição à radiação solar [10].

A UE, através do *JRC*, desenvolveu um estudo de quantificação da radiação global e potencial elétrico solar no plano horizontal e inclinado ótimo, patente Anexo 2, para colocação de módulos fotovoltaicos em Portugal [13].

Através dos mapas de radiação do Anexo 2 verifica-se uma ligeira melhoria dos valores da radiação solar para a Ilha da Madeira em relação aos mapas de radiação anteriormente exemplificados, uma vez que, no mapa de radiação no plano inclinado ótimo os valores da radiação solar são mais elevados que nos mapas de radiação solar no plano horizontal.

2.5 Tecnologias solares eleitas para implementação nos edifícios públicos

Hoje em dia existem muitas tecnologias que aproveitam a energia solar para a transformar em diversas formas mas sempre com o objetivo final de poupar a energia produzida através de recursos fósseis. Estas tecnologias podem ser: painéis térmicos, tubos solares, FV, concentradores solares, entre muitos outros.

Neste estudo, o maior protagonismo caberá aos FV, enquanto tecnologia dominante do mercado, no sector da produção de energia elétrica. Esta tese está orientada para os edifícios públicos da RAM e, como tal, são avaliadas quais as necessidades prioritárias para cada um dos edifícios, como por exemplo, prédios com serviços governamentais e, principalmente, escolas públicas.

Com isto em mente, a tecnologia dos painéis térmicos surgiu no contexto desta tese como tecnologia a implementar neste estudo, como forma de suprimir muitas dependências e necessidades como a utilização de gás natural para aquecimento da água de piscinas. Esta tecnologia já tem os créditos firmados globalmente e regionalmente, tendo obtido excelentes resultados e uma grande adesão por parte da população madeirense.

2.5.1 Painéis solares fotovoltaicos

Estes dispositivos são utilizados para converter a luz do Sol em energia elétrica sendo que, para tal, são compostos por células solares que captam a energia solar. Estas células solares são designadas de células fotovoltaicas e criam uma diferença de potencial elétrico por ação da luz solar ou artificial (efeito fotovoltaico). Infelizmente o rendimento global da conversão de energia solar em elétrica é baixo, na ordem dos 15%.

Nos últimos oito anos verificou-se uma diminuição constante ao longo do tempo do preço das instalações de painéis solares fotovoltaicos devido ao custo de fabricação dos componentes

destes sistemas ter baixado. Mas, apesar desde contínuo decréscimo não deixa de ser um investimento dispendioso que possui um retorno mais longo que os painéis térmicos devido, em grande parte, à logística e equipamentos que envolve.

Devido às diversas vantagens dos FV, como a simplicidade de operação, fácil manutenção (limpezas anuais dos painéis solares para remover poeiras/sujidades) e dispensa de componentes com peças móveis, como os geradores elétricos, que são muitas vezes problemáticos sobre o ponto de vista da fiabilidade, faz com que sejam utilizados em inúmeras aplicações, destacando-se:

- Aplicações de pequena potência (décimas até unidades de kW) – Relógios, calculadoras, acessórios de veículos automóveis, sinais rodoviários, parquímetros, telefones de emergência, entre muitos outros;
- Aplicações de média potência (dezenas a centenas de kW) – Eletrificação rural, designadamente, estações de bombagem de águas e irrigação, abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede; Sistemas domésticos ligados à rede, como por exemplo, telhados de habitações localizadas em áreas desenvolvidas, sendo as mesmas urbanas ou rurais (microprodução);
- Aplicações de grande potência (unidades ou dezenas de MW) – Produção descentralizada ligada à rede [2].

Em muitas destas aplicações, os sistemas de painéis fotovoltaicos servem como alternativa a outros meios de produção de energia ou inexistentes, designadamente nas aplicações de pequena potência, onde a sua difusão é grande.

2.5.1.1 Aplicações de média e grande potência

As aplicações de pequena potência não são abordadas neste estudo porque, sob o ponto de vista da engenharia eletrotécnica e pelo contexto do estudo que se realizou, não se adequam ao mesmo logo apenas as aplicações em grande e média escala são abordadas. Nestas aplicações os FV podem ser operados de quatro formas:

- **Ligados à rede de energia elétrica preexistente**, à qual entregam toda a energia que a energia solar lhes permite produzir. Para tal, é necessário um inversor que serve de componente de interface entre a rede e o painel, de modo a adaptar as formas de onda das grandezas elétricas contínuas (DC) do painel às formas de onda alternadas (AC) impostas pela rede [2].
- **Em sistema isolado**, alimentando diretamente cargas. Neste modo de operação, o sistema terá de ser dimensionado para assegurar durante todo o ano o abastecimento. Então é necessário ter, em conjunto com os PV, os seguintes componentes:

  - Baterias/Acumuladores (opcional), para assegurar o abastecimento nos períodos em que o recurso solar é insuficiente ou não está disponível; as baterias são então carregadas quando este está disponível, obtendo-se uma potência superior à potência de carga;

  - Regulador de carga, que efetua a gestão da carga de modo a obter perfis compatíveis com a energia solar disponível e com a capacidade das baterias;

  - Inversor, requerido se houver cargas alimentadas em AC [2].
- **Autoconsumo**, idêntico ao sistema isolado mas com uma ligação à rede pública para suprimir as restantes necessidades energéticas que o FV não consiga satisfazer.
- **Em sistema híbrido**, alimentando diretamente cargas isoladas, em conjunto com outros conversores de energia renováveis, como por exemplo, o eólico. Neste modo de funcionamento, os dispositivos requeridos são os mesmos que para o funcionamento em

sistema isolado, podendo existir opcionalmente um meio de produção convencional, normalmente um gerador a *diesel*, para auxílio e reserva [2].

Os FV, sozinhos ou em associação com outras energias renováveis, são já competitivos para alimentação de certos locais remotos (Ilhas das Desertas ou Selvagens) onde as soluções alternativas convencionais, como um gerador a *diesel* ou rede elétrica, são evidentemente inexistentes ou inferiores, sobre o ponto de vista económico e, têm os inconvenientes ambientais não negligenciáveis.

Até 2009, verificou-se que as aplicações conectadas à rede vieram gradualmente a aumentar no universo de FV, representando cerca de 90% do total de instalações.

2.5.1.2 Tipos de regimes possíveis para os FV

Atualmente podem-se escolher entre dois tipos de regimes de geração de energia e posterior venda da mesma: Microprodução e Miniprodução.

Para a microprodução, em regime bonificado, o decreto-lei n.º 25/2013 refere que a tarifa de referência está fixada em 0,40 €/kWh para o primeiro período e em 0,24 €/kWh para o segundo período, sendo que, o valor de ambas as tarifas é sucessivamente reduzido anualmente em 0,02 €/kWh para novas instalações [14]. Assim, por despacho da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), a tarifa única de referência atual para os microprodutores é de 0,066 €/kWh para os primeiros 8 anos e 0,145 €/kWh para os restantes 7 anos, sendo removidos todos os incentivos fiscais [15]. A tarifa única de referência para o regime geral é de 0,142 €/kWh, até a entrada em vigor do diploma que procederá à revisão do regime jurídico da microprodução e miniprodução.

Para a miniprodução, o regime bonificado possui um contrato com duração de 15 anos, com uma tarifa fixa de 0,25 €/kWh produzido, sendo o mesmo valor reduzido anualmente em 7%. Findo este contrato, o miniprodutor ingressa no regime geral [14] [16]. Neste regime os sistemas fotovoltaicos até 250 kW são classificados em três grupos:

- Escalão I (até 20 kW) com o valor pago por cada kW produzido de 0,151 € (em 2013);
- Escalão II (de 20 kW a 100 kW) sendo o valor pago por kW produzido definido em leilão;
- Escalão III (de 100 kW a 250 kW) sendo o valor pago por kW produzido definido em leilão.

Atualmente a tarifa única de referência para os miniprodutores do escalão I é de 0,106 €/kWh em regime bonificado e de 0,142 €/kWh para o regime geral (2014) [17]. Normalmente, a tarifa média paga para os escalões II e III ronda os 0,125 €/kWh.

No capítulo 4, secção 4.3, o decreto-lei n.º 25/2013 será explicado mais detalhadamente, assim como, será feita uma breve revisão aos regulamentos legais dos FV desde 2007.

2.5.1.3 Custos de investimentos

O custo de investimento de FV é geralmente referido sob a forma de custo por watt-pico (€/Wp). O custo contém tanto os módulos propriamente ditos como os componentes de interface e regulação entre os PV e a rede [2].

Em Portugal, os custos médios de investimento dos sistemas FV rondam os 4,2 €/Wp (preços de 2008), para os sistemas de grande dimensão ligados à rede (miniprodução). Em 2008, os sistemas domésticos ligados à rede (microprodução) eram mais caros, oscilando entre 5 a 6 €/Wp [2]. Com o decréscimo dos custos dos FV, o valor atual das instalações domésticas ronda os 2,7 €/Wp (preços de 2013).

Tendo em conta o preço médio a que a empresa de eletricidade paga a energia produzida nas centrais fotovoltaicas, e para a gama de variação anual da potência-pico esperada em Portugal

(1.400 e 1.600 horas anuais) e na RAM entre as 1.800 e 2.600 horas anuais (valor da insolação), é fundamental que o investimento por unidade de potência-pico (Wp) em instalações conectadas à rede não ultrapasse o valor de referência, designadamente 4 €/Wp (valores de 2010), de forma a assegurar a viabilidade do projeto [8] [2].

2.5.1.4 Funcionamento do sistema fotovoltaico

O funcionamento do sistema solar pode ser sintetizado na figura 10, sendo posteriormente explicado em mais detalhe. O esquema de montagem do FV nesta figura tem o objetivo de venda da eletricidade produzida, sendo a mesma injetada na rede pública.
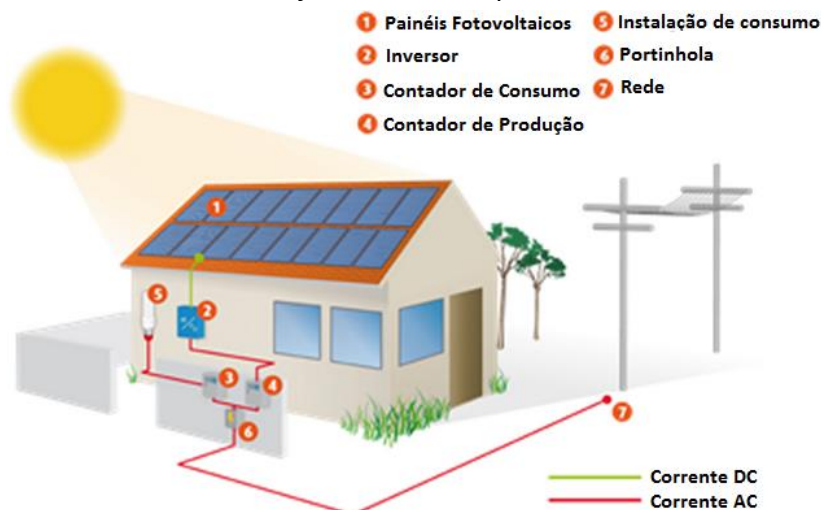
Figura 10 - Constituição básica de um sistema solar fotovoltaico [18].

Através da figura 10, pode-se verificar o princípio de funcionamento deste tipo de sistema solar de produção de energia elétrica. Basicamente, os painéis fotovoltaicos recebem a radiação solar, convertendo a mesma em energia elétrica contínua através da tecnologia presente no painel solar.

Para consumo próprio ou para injetar a energia produzida pelos painéis solares na rede pública é necessário converter a energia de DC para AC. Isto porque, quase todos os aparelhos domésticos requerem corrente alternada aos seus terminais para funcionar ou, no caso de injetar na rede, como esta é distribuída pela empresa de eletricidade em corrente alternada (AC), é obrigatório ter as mesmas características que a energia distribuída ao público, de forma a não destabilizar a rede de distribuição.

Existem dois contadores presentes na instalação elétrica, um para contagem da produção e outro para o consumo. Ou seja, o contador de produção contabiliza toda a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e o contador de consumo regista toda a energia elétrica proveniente da rede pública, consumida pela instalação elétrica. Assim, o utilizador sabe a qualquer altura quanta energia elétrica está sendo produzida pelo FV e quanto está consumindo.

A eletricidade entra nas habitações através de uma caixa, designada portinhola e que, por sua vez, possui fusíveis de proteção. Nos edifícios de maior potência (90 kVA), a portinhola é substituída por um quadro de colunas, onde também existem fusíveis de proteção e de onde partem as colunas que posteriormente alimentaram os vários pisos do edifício, assim como os serviços comuns, nomeadamente, luzes de emergência, portas de garagem, elevadores e muitos outros.

Por fim, a instalação elétrica característica de cada edifício varia a sua estrutura conforme o fim a que se destina, assim como as suas dimensões, como explícito no caso da portinhola. É importante mencionar que, existem outros componentes fundamentais para o bom funcionamento

de um FV, como os disjuntores e os fusíveis, que fornecem proteção contra descargas atmosféricas ou outras situações anómalas.

No caso de Portugal Continental, ao nível de distribuidores de eletricidade há duas opções, sendo: pública ou privada. Já a nível regional, existe apenas a vertente pública, estando a cargo da EEM o fornecimento e distribuição de energia elétrica a todos os edifícios da RAM.

2.5.1.5 Constituição dos sistemas fotovoltaicos

Os componentes gerais dos FV são: PV, estrutura de suporte para os mesmos, reguladores de carga, monitor para regulador de carga, baterias/acumuladores, inversor e cabos elétricos.

Geralmente os PV são constituídos por cristais de silício, existindo atualmente três tipos de painéis, nomeadamente, os painéis Monocristalinos, Policristalinos e os Amorfos.

Os painéis monocristalinos têm esta designação porque as células fotovoltaicas que os constituem são feitas por secções de uma única peça de cristal de silício. Este facto, apesar de encarecer o painel, compensa porque aumenta a durabilidade do mesmo (superior a 25 anos) e a sua eficiência em relação a painéis mais baratos. Estes painéis são facilmente reconhecidos porque são mais finos que os policristalinos e têm uma cor azul-escura. Estes painéis são a escolha ideal para sistemas de microprodução [19]. Estes têm um custo de fabrico mais caro devido à sua complexidade de fabricação e à sua elevada necessidade de energia para serem produzidos [20].

Já os painéis policristalinos têm esta designação porque as células solares que os constituem são feitas a partir de um processo menos rigoroso do que os monocristalinos, dos quais são feitas a partir de vários cristais. Estes painéis acabam por ser a escolha preferencial de muitos consumidores devido ao seu custo relativamente baixo em comparação com aos painéis monocristalinos (em cerca de 20%). Mas nem sempre esta diferença de preços compensa a longo prazo. Também são utilizados na microprodução, tendo uma vida útil longa mas perdendo para os monocristalinos na sua menor eficiência [19].

Os painéis de silício amorfo diferem das estruturas cristalinas dos painéis anteriormente descritos devido ao seu elevado grau de desorganização da estrutura dos átomos. A utilização do silício amorfo no uso de células fotovoltaicas tem tido grandes vantagens nas propriedades elétricas, uma vez que, estas células reagem melhor à luz difusa e fluorescente, tendo uma menor perda em altas temperaturas, e no seu fabrico, fácil e barato [19]. Como possuem uma eficiência relativamente baixa, o seu uso comercial é restringido na microprodução [20].

Recentemente estas células têm sido alvo de grandes investimentos como sistemas fotovoltaicos de baixo custo devido ao facto de apresentar uma absorção de energia solar na faixa do visível e podendo ser fabricado com uma deposição de diversos tipos de substratos.

As desvantagens deste tipo de células são: baixa eficiência de conversão em relação a outros tipos de painéis e, devido ao processo de degradação, as células são afetadas logo nos primeiros meses de funcionamento, reduzindo a eficiência ao longo da sua vida útil.

O uso de baterias num sistema fotovoltaico pode ser ou não opcional, variando consoante o propósito final, nomeadamente, para autoconsumo ou autónomo/isolado. Se for para autoconsumo as baterias são um elemento opcional porque estas guardam toda a energia produzida extra que não está a ser consumida em determinado momento, para depois (geralmente à noite) fornecer energia ao prédio. Já para os sistemas fotovoltaicos autónomos estas são fundamentais para armazenar a energia produzida pelo FV e, utilizá-la quando necessário. Normalmente as baterias são do tipo chumbo-ácido e representam cerca de 15% do investimento inicial, o que é elevado considerando o seu tempo de vida útil (entre 7 a 12 anos).

Resumindo, as baterias são utilizadas nos casos em que a necessidade de energia não corresponde com o período de incidência solar. A escolha das mesmas realiza-se através de uma aproximação da potência média diária (curva P-I do painel solar) e do tempo de armazenamento necessário.

Por fim, a função principal do inversor de corrente é estabelecer a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede elétrica AC ou a carga AC. Neste contexto, a principal tarefa consiste em converter o sinal elétrico DC do painel solar num sinal elétrico AC, ajustando-o para a frequência e nível de tensão da rede que estará ligado, ou seja, neste caso para a frequência de 50 Hz e para a tensão de aproximadamente 220 V (em Portugal).

2.5.1.6 Análise da eficiência dos painéis fotovoltaicos

Os sistemas de produção de energia fotovoltaica convertem diretamente a energia solar em energia elétrica. Estes sistemas são constituídos por um conjunto de painéis de material semicondutor (PV) e um sistema de suporte que inclui a cablagem, o inversor DC/AC, que é indispensável em sistemas conectados à rede pública, ou o regulador de carga e as baterias, fundamentais nos FV isolados.

Os PV são os elementos mais importantes do FV porque é através destes que ocorre o processo de conversão de energia solar em elétrica logo a eficiência total do FV está diretamente associada à eficiência dos PV.

A eficiência do módulo fotovoltaico (η) define a percentagem de energia solar transformada em energia elétrica, sendo esta obtida através da relação entre a potência gerada pelo módulo e a irradiação incidente sobre o módulo (1). Segundo Treble (1980) e Overstraeten e Mertens (1996), a eficiência do módulo pode ser obtida pela equação 1 [21].

$$\eta = \frac{(\mathrm{Im}\,p \times Vmp)}{(Ic \times A)} \times 100 \qquad (1)$$

sendo que, Ic é a irradiação solar expressa em W m^{-2}; A é a área útil do módulo solar (m^2); Imp é a corrente máxima de pico (A); e Vmp é a tensão máxima de pico expressa em Volts (V) [21].

A eficiência de um conjunto fotovoltaico num sistema de produção de energia elétrica, de acordo com Cardona e López (1999) [21], pode ser obtida através da relação entre o total de energia diária produzida e a energia diária incidente na superfície do módulo (2). Assim, o rendimento diário do conjunto fotovoltaico (ηpvd) é dado pela seguinte equação [21]:

$$\eta pvd = \frac{E_{Pv,d}}{E_{r,d}} \qquad (2)$$

sendo que, $E_{Pv,d}$ é a potência diária fornecida pelo módulo expressa em W m^{-2}; e $E_{r,d}$ é a irradiação diária na superfície do conjunto fotovoltaico (W m^{-2}).

Logo, a média do rendimento diário (η_m) é obtida por:

$$\eta_m = \frac{\sum_{D=1}^{D} \eta pvd}{D} \qquad (3)$$

sendo que, D é o número de dias com dados, do período analisado.

Observando o desenvolvimento tecnológico dos FV, verifica-se que o maior progresso se deu, em grande parte, baseado em células de silício (PV), que constituem as tecnologias de 1ª geração.

Nos últimos seis anos, as tecnologias de filme fino começaram a ganhar mais relevo no mercado devido ao seu processo de fabrico gerar uma poupança considerável de matéria-prima,

inaugurando assim, as tecnologias de 2ª geração. É importante mencionar que, algumas das tecnologias de filme fino são constituídas por silício amorfo.

Atualmente, ainda em fase de investigação e experimentação, as novas tecnologias fotovoltaicas prometem desenvolvimentos assinaláveis no médio prazo, correspondendo estas à 3ª geração [2].

No anexo 3 são apresentadas as tecnologias de 2ª e 3ª geração de PV, assim como as características sobre as suas constituições, eficiências e futuros desenvolvimentos/aplicações.

2.5.1.7.1 Tecnologias de 1ª geração – Silício Cristalino

As tecnologias fotovoltaicas de 1ª geração ou convencionais, formadas pelas células de silício cristalino, dominam o mercado com um *share* global de 87%. Estas células estão repartidas por três tipos principais:

- Silício monocristalino: Possui a taxa de conversão de energia mais elevada de todos os tipos de painéis, situando-se entre 14% a 18% em condições normais e em condições laboratoriais (ideais) consegue-se 23%. Correspondem a cerca de 35% do mercado das células de silício cristalino;
- Silício multicristalino ou policristalino: Possui uma taxa de conversão de energia entre 11% a 14% em condições normais e 18% em condições laboratoriais (ideais). Representam 49% do mercado das células de silício cristalino;
- Fitas de silício: Este tipo de célula tem a taxa de conversão mais baixa, situada entre 8% a 10%, atingindo os 13% em condições laboratoriais (ideais). Têm uma participação residual de 3% no mercado [2].

O silício é um absorvedor de luz relativamente pobre, o que implica a utilização de camadas de material com espessura de algumas centenas de microns (μ), o que significa uma utilização de material semicondutor não desprezável, face à energia a produzir. Entretanto, o seu uso em células fotovoltaicas é muito relevante devido às características de estabilidade obtidas com relativamente boas eficiências, situando-se entre 11% a 16%, correspondendo a cerca de metade a dois terços, do máximo teórico [2].

Apesar do mercado ser fortemente dominado pelas células de silício cristalino (1ª geração), outras tecnologias emergentes têm-se perfilado como fortes concorrentes às células mono e policristalinas, nomeadamente:

- **Tecnologias de elevada eficiência**

Como atrás mencionado, as células de 1ª geração são fortemente dominadas pelas células de silício cristalino, apresentando-se no mercado com dois tipos principais, monocristalino e policristalino.

Além do silício, foram usados outros elementos no processo de fabricação de células fotovoltaicas, com um princípio de funcionamento semelhante, mas até agora sem sucesso comercial. Destacam-se, pela sua importância, os elementos pertencentes aos grupos III a V da tabela periódica, nomeadamente, o Fosforeto de Índio (InP) e o Arseneto de Gálio (GaAs), usados em células, ditas de junção simples, de alta eficiência (superior a 20%). A desvantagem de utilizar estes materiais, além da escassez dos mesmos, são os custos elevados. Assim, têm sido fortemente aplicados em soluções aeroespaciais, como satélites ou outros objetos utilizados no espaço [2].

A utilização e desenvolvimento de junções simples foram abandonados, uma vez que, numa configuração multijunções destes materiais se atingem níveis de eficiência superiores ao aumento de

custo relativo. As células multijunção aparecem para dar resposta ao problema de energia residual da radiação não absorvida pela primeira camada das células, ou porque a energia associada ao fotão é insuficiente ou porque o excesso de energia não transferida para o eletrão é perdida sob a forma de energia térmica.

De forma a superar esta ineficiência, o desenho de células inclui múltiplas camadas, geralmente, duas ou três, em *tandem*, com bandas de energia distintas. Nas células feitas à base de junções de Arseneto de Gálio, de Índio e de Germânio atingem-se rendimentos superiores a 35%. Obviamente que, estas soluções aumentam a complexidade e o custo do processo de fabrico, além da estabilidade e valor da eficiência elétrica. A figura 11 mostra o aspeto geral de uma célula fotovoltaica multijunção.
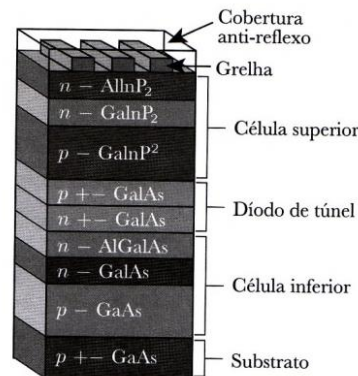
Figura 11 - Célula fotovoltaica multijunção [2].

- **Tecnologias de concentração**

Este tipo de tecnologia possui um tipo diferente de gerador fotovoltaico, designado de concentração (*CPV*). Esta tecnologia utiliza um sistema ótico, constituído por lentes de Fresnel ou espelhos, de forma a concentrar a radiação solar em células fotovoltaicas. Estes sistemas atingem eficiências à volta dos 25% na transformação da energia solar em energia elétrica.

Um atributo relevante deste tipo de sistema de produção de energia elétrica é o facto de funcionarem apenas com a radiação que provém diretamente do Sol, designada de radiação direta [2].

Estes FV de concentração têm duas vertentes, nomeadamente, baixa ou alta concentração. Os sistemas de baixa concentração caracterizam-se por:

- Relações de concentração da ordem de 20 vezes;
- Utilização de módulos fotovoltaicos convencionais, de silício ou filme fino;
- São equipados com sistemas de seguimento da posição solar a um eixo, de média precisão [2].
- Os sistemas de alta concentração têm:
- Relações de concentração de 500 vezes ou mais;
- Células fotovoltaicas de elevado rendimento, semelhantes às utilizadas nas aplicações espaciais, como referido anteriormente;
- Sistemas de seguimento da posição solar a dois eixos, de grande precisão [2].

Esta tecnologia tem dois objetivos principais: aumento da eficiência global do processo de conversão e a diminuição do custo de produção de eletricidade, através do uso de equipamentos de pequena dimensão, apesar de mais caros, por unidade [2].

2.5.1.8 Balanço tecnológico

Em termos gerais pode se declarar que as células de filme fino são, hoje em dia, mais baratas que as células de silício cristalino mas menos eficientes na conversão energética. A tecnologia de filme fino é competitiva em relação à tecnologia convencional, de acordo com as análises económicas, contabilizando, como é óbvio, o investimento e eficiência de cada uma das tecnologias.

Para que as diferentes tecnologias de filme fino descritas no Anexo 3 consigam impor-se às tecnologias de silício cristalino, estas constantemente procuram condições para tal e, depois, atingir a igualdade, face às atuais fontes de energia fósseis. Estas condições passam pelo aumento do rendimento dos módulos ou até mesmo pela redução do custo dos mesmos.

Eventualmente a indústria acabará por optar por uma determinada tecnologia, implicando que as correspondentes economias de escala podem impor uma redução do custo por watt-pico (Wp), previsivelmente para valores bem menores que 1 €. Algumas destas tecnologias de filme fino disfrutam de um processo de produção mais fácil e menos dispendioso, mas apesar destas vantagens, alguns críticos permanecem céticos quanto à capacidade desta tecnologia singrar no mercado, impondo-se ao silício cristalino, como objetivo final. Atualmente, a tecnologia de filme fino amorfo custa aproximadamente 1,20 €/Wp, tornando a mesma, muito mais barata que os valores pagos por Wp nos painéis de 1ª geração (silício), que rondam os 2,7 €/Wp.

Os preços da matéria-prima constituinte de filme fino estão a diminuir devido à capacidade de fabricação deste material por parte da indústria fotovoltaica, por oposição ao uso de silício oriundo da indústria da microeletrónica e, as suas eficiências estão a aumentar. Graças à versatilidade dos diferentes substratos que estão disponíveis neste tipo de tecnologia, este poderá emergir como detentor de um pequeno mercado particular, como por exemplo, aplicações em edifícios, nos telhados ou em fachadas.

Este sector é intitulado de fotovoltaico integrado em prédios, uma vez que, permite poupar nos materiais utilizados para a sua construção, tornando-se mais competitivo e apresentando várias soluções, como películas translúcidas para integração em vidros ou soluções integradas em telhas. Estas últimas soluções têm sido fortemente utilizadas por arquitetos e empresas, como forma de tornar os seus projetos mais "amigos" do ambiente.

A tecnologia de filme fino possui duas funções, publicitadas pelo mercado atual, sendo a produção de energia limpa e a impermeabilização de edifícios. Outra grande vantagem destas telas solares é a sua elevada resistência e esperança média de vida útil, rondando os 50 anos. São estes factos que potenciam e estabelecem esta tecnologia nos mercados mundiais como uma alternativa a ter em conta em projetos de energia renováveis.

Como tal, a indústria fotovoltaica tem duas prioridades, a diminuição dos custos e a subida das eficiências. Estes são os pilares que mobilizam a indústria mundial para aproveitar o enorme potencial das tecnologias de filme fino. Um facto já pode ser comprovado, que é o abaixamento consecutivo de custos ao longo dos anos, com uma ligeira tendência para continuar a diminuir mas, ainda está longe de atingir o objetivo de otimização das eficiências.

2.5.1.9 Instalação dos sistemas fotovoltaicos

No caso específico das tecnologias fotovoltaicas, segundo o manual de instalações solares, proposto pelo Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia e Inovação (INETI), utilizado pelos instaladores solares credenciados, os painéis solares devem ser montados de forma a tirar o melhor partido do Sol [22]. A orientação recomendada é o Sul geográfico, facilmente encontrado através da direção Este-Oeste, sendo tolerados desvios de 15° (β) em relação ao azimute e 10° em relação à

inclinação, conforme visualizado na figura 12. O valor máximo obtido para a captação de radiação solar pelo PV, estará em geral num "planalto" de otimização, sendo que, estes desvios são permitidos uma vez que não há perda significativa de radiação solar absorvida [23].
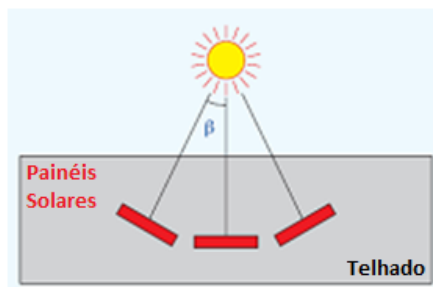
Figura 12 - Ângulo de orientação dos painéis relativamente a sul [23].

Mas, no caso de existir um desvio, é preferível que este seja para Oeste e não Este, tornando-se menos prejudicial para o rendimento dos painéis solares, pois assim aproveitam a radiação solar por mais tempo durante as horas em que a temperatura ambiente é mais elevada (parte da tarde) [23].

Quanto à inclinação dos painéis solares, esta é igualmente recomendada pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGGE) através do manual de instaladores do INETI, sendo que esta se relaciona com a altura do Sol sobre a linha do horizonte ao longo do ano (tabela 8 e figura 13) [23].

Tabela 8 - Inclinação dos painéis solares consoante o período de utilização do ano [23].

Utilização	Inclinação (°)
Inverno	Latitude do local +15°
Verão	Latitude do local -15°
Período Anual	Latitude do local -5°

Figura 13 - Demonstração da altura solar ao longo do ano [23].

No nosso hemisfério (Portugal), a orientação e inclinação recomendada para a instalação dos sistemas solares é o Sul geográfico e entre 25 a 30° [24].

Quando se fala em instalações solares de grandes dimensões, sejam térmicas ou fotovoltaicas, usualmente colocam-se os módulos em fileiras, uns atrás dos outros. Assim, é necessário considerar o sombreamento induzido pelo ambiente circundante (árvores, prédios, etc.) mas também o sombreamento que os módulos projetam entre si (figura 14).
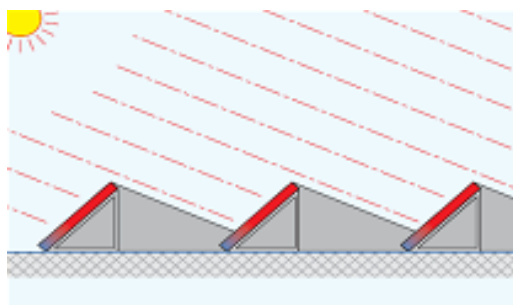
Figura 14 - Fenómeno do sombreamento entre fileiras de painéis solares [23].

Segundo Doninelli, (2006) pode-se considerar entre cada fila de módulos solares as distâncias referidas na tabela 9 para valores de funcionamento médios anuais (figura 15). É importante referir que, pode-se reduzir esta distância em 25% para casos de falta de espaço, sem grande prejuízo em termos de rendimento [25].

Tabela 9 - Cálculo do espaçamento entre fileiras de acordo com a inclinação [23].

Ângulos (°)	Distâncias (m)
α = 30°	d = h * 2,3
α = 45°	d = h * 2,7
α = 60°	d = h * 2,8
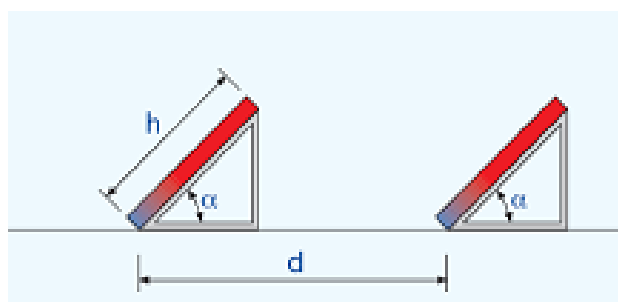
Figura 15 - Ilustração do afastamento aconselhado entre coletores [23].

2.5.2 Painéis solares térmicos

Os sistemas utilizados para aquecer a água através da energia solar são designados de solares térmicos e funcionam de modo muito simples: a radiação solar atinge um coletor solar de vidro, provocando um efeito de estufa e aquecendo um fluido térmico, em geral, água com anticongelante; um permutador de calor transmite então o calor gerado no fluido térmico para a água de consumo. Este tipo de instalações solares térmicas para aquecimento de águas sanitárias, cujo rendimento se situa entre 30% a 50%, encontra-se largamente difundido.

Existem duas tecnologias associadas aos painéis térmicos, os painéis térmicos com coletores solares planos e os painéis térmicos com coletores solares de tubos de vácuo. Ambos com aplicações distintas mas com a mesma função final, ou seja, aquecimento de águas. Com os recentes progressos nesta área, este último sistema de aquecimento de águas tornou-se no mais rentável do mercado.

Geralmente, os painéis térmicos com coletores solares planos são para aplicações domésticas, ou seja, para pequenas instalações que necessitam de aquecimento de águas com temperaturas superiores a 40 °C. Já os painéis térmicos com coletores solares de tubos de vácuo são utilizados no aquecimento de grandes quantidades de água, a temperaturas mais baixas (≈ 30 °C), como por exemplo, piscinas cobertas ou exteriores.

Nos últimos seis anos assistiu-se a uma grande explosão na adesão aos painéis térmicos planos devido aos apoios oferecidos pelo governo nacional (redução IMI, abate no IRS e incentivos monetários) e apoios comunitários provenientes da UE, aos custos das instalações térmicas terem

baixado significativamente e a uma maior divulgação e publicidade da tecnologia, aliada aos seus excelentes resultados.

A exigência de um estudo energético para uma nova habitação, ou prédio de qualquer natureza, consciencializou as pessoas para o tema da poluição e das energias renováveis. Além de que, consoante a sua avaliação, é classificada desde a classe A (mais eficiente) até a classe F (menos eficiente) aplicando os valores de impostos (Imposto Municipal Sobre Imóveis - IMI) a pagar consoante a classe do prédio, sendo a classe A a que paga menos imposto e a classe F a que paga mais.

2.5.2.1 Painéis térmicos com coletores solares de tubos de vácuo

Este tipo de sistema possui um rendimento elevado e custos de manutenção muito baixos, tornando-se assim no sistema de aquecimento de águas mais rentável, disponível no mercado atual.

Este tipo de painéis térmicos produz mais de 800 W/h de energia por 1 m^2, significando este valor que, a energia solar que chega a Portugal é aproveitada numa grande percentagem (67%). Esta eficiência deve-se em grande parte à forma cilíndrica do tubo de vácuo que, devido à sua forma o sol incide sempre sobre ele perpendicularmente, reduzindo a reflexão e maximizando a quantidade total de radiação solar a que os coletores estão expostos durante o dia.

O elemento chave deste sistema de aquecimento de águas são os tubos de vácuo de alta tecnologia. Estes não só absorvem a radiação solar direta, como absorvem o calor do meio ambiente em que estão instalados e a radiação solar difusa (céu nublado). Ou seja, são capazes de absorver a energia da gama dos raios infravermelhos e ultravioletas (UV) que penetram as nuvens, aquecendo a água mesmo em dias nublados [6].

Este sistema solar baseia-se no princípio de concentração, no qual, existe uma superfície refletora curva, que recebe a radiação de todas as direções. Esta curva faz com que os raios sejam projetados para a zona central do tubo de vácuo, concentrando-os e assim elevando a temperatura [6]. Esta temperatura é transmitida para a parte superior do coletor para aproveitamento posterior, sendo a transmissão realizada através de dois processos, designadamente, fluxo direto ou com tubo de calor.

O facto de existir um espaço em vácuo no tubo permite uma captação constante de energia mesmo quando presente a temperaturas exteriores negativas, sendo unicamente necessário a existência de luz solar, uma vez que, o vento e as baixas temperaturas têm pouco efeito na eficiência dos painéis térmicos de tubos de vácuo [6]. A figura 16 mostra um esquema ilustrativo deste tipo de tecnologia.

Figura 16 - Sistema solar térmico de tubos de vácuo, com sistema de termossifão [6].

Os sistemas térmicos com coletores de tubos de vácuo são de montagem simples e fácil e têm uma grande captação da radiação solar. A água é aquecida utilizando a energia solar incidente nos coletores colocados nos telhados de edifícios ou em paredes direcionadas para o Sol. Dependendo dos casos ou situações, os coletores podem ser instalados no solo desde que este esteja orientado para o Sol, de forma a receber diretamente os raios solares.

2.5.2.1.1 Tipos de aquecimento com o sistema térmico com coletores de tubos de vácuo

Este sistema pode ser empregue em diversas situações e para vários fins. De seguida, são enumerados e explicados alguns dos principais tipos de aquecimento disponíveis para este sistema:

1. **Aquecimento de Águas Quentes Sanitárias**

   Este tipo de aquecimento pode ser feito de duas formas, sendo:

- **Sistema de Termossifão** - Este sistema utiliza o efeito de termossifão. Este efeito é o resultado da diferença de densidades entre a água quente aquecida através da energia solar e a água fria do reservatório, proveniente da rede pública. Estes sistemas não necessitam de bombas de circulação nem controladores, tornando este sistema muito mais económico. Na figura 16 apresenta-se um exemplo deste tipo de sistema [6].
- **Sistema de Circulação Forçada** - Neste caso o reservatório é colocado separadamente dos painéis solares, numa posição vertical para melhor uniformização dos níveis de temperatura e um maior aproveitamento da radiação solar. Geralmente a localização do mesmo é resguardada, minimizando as perdas térmicas. A figura 17 mostra um exemplo deste tipo de sistema [6].
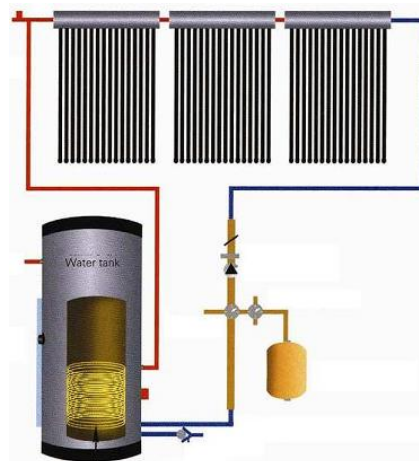
Figura 17 - Sistema de circulação forçada [6].

As grandes diferenças entre estes dois processos de aquecimento de águas são: funcionamento e as suas aplicações. A nível das aplicações basicamente deve-se ao facto de o sistema de Termossifão ser ideal para aquecimento de volumes pequenos de águas sanitárias uma vez que não requerem espaço no interior da habitação. Normalmente este sistema possui um sistema de apoio, como uma simples resistência elétrica acoplada ao reservatório, de forma a manter a água quente durante todo o ano em caso de condições climatéricas desfavoráveis.

Já o sistema de Circulação Forçada garante uma temperatura média anual de 60/70 °C, sendo mais utilizado em aquecimento de grandes volumes de água, como por exemplo, piscinas, escolas, pavilhões, hotéis, entre muitos outros; onde existem de facto gastos elevados de energia.

Comparando estes dois sistemas, o sistema de Circulação Forçada tem a vantagem de ser mais visualmente agradável, devido a não possuir o depósito por cima dos painéis e, tem menores

perdas de calor. A desvantagem deste sistema é a distância das tubagens que transportam o fluido térmico e o seu preço.

1. **Aquecimento do Ambiente através da energia solar**

Para aproveitar ao máximo a radiação solar disponível, combina-se o sistema solar com o sistema de aquecimento tradicional, para aquecimento central. Para tal, recorre-se a radiadores, piso radiante ou ventiloconvectores para aquecer a habitação ou salas através da energia acumulada. Ao nível económico, é melhor combinar o aquecimento solar com o piso radiante devido a ter de se utilizar temperaturas inferiores comparativamente aos outros sistemas [6].

Assim, com a combinação dos sistemas de climatização, garante-se uma melhor eficiência energética. Nas figuras 18 a) e 18 b), está um exemplo deste sistema de aquecimento em piso radiante e outro exemplo deste sistema com radiadores, respetivamente.
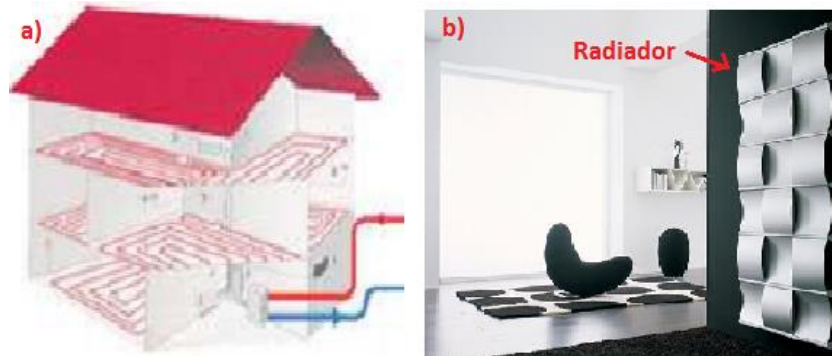
Figura 18 - Exemplos de aplicação desta tecnologia em sistemas de climatização [6] [26].

2. **Aquecimento de Piscinas**

Este tipo de aquecimento é a aplicação ideal para o uso de painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo, uma vez que, a temperatura requerida para a água das piscinas é muito baixa (≈ 30 °C).

Comparando esta tecnologia com os painéis solares térmicos planos, os painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo têm as seguintes vantagens:

- Ocupam uma área de instalação menor que os painéis solares térmicos planos, uma vez que os painéis solares térmicos planos necessitam de uma área de instalação com cerca de 50% da área da piscina, enquanto que, nos coletores de tubos de vácuo essa área é diminuída para 25%. Logo a instalação e o sistema de aquecimento torna-se mais económico, com menos custos de manutenção e assim com um retorno mais rápido;
- Graças à elevada eficiência dos coletores de tubos de vácuo, mesmo durante o Inverno mais rigoroso, grande parte do aquecimento da piscina está assegurado;
- Existe também a possibilidade de emprego deste tipo de sistema de aquecimento em piscinas particulares conjuntamente com o aquecimento da habitação, rentabilizando estes sistemas;
- Nas piscinas cobertas que têm uma utilização anual, seja para aulas de natação, treinos de equipas desportivas, ginástica de manutenção ou para lazer, o retorno de um investimento deste calibre é realizado num período curto (≈ 2 anos) [6].

3. **Aquecimento Industrial**

O facto de se poder conectar em série os painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo torna esta tecnologia ideal para algumas indústrias, onde a necessidade de águas quentes é muito grande [6]. Na figura 19 apresenta-se uma demonstração dos painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo ligados em série.

Figura 19 - Painéis solares de tubos de vácuo conectados em série [6].

2.5.2.1.2 Instalação e Vantagens

Estes sistemas minimizam os efeitos ambientais derivados da produção energética atualmente utilizada para aquecimento destas águas (gás natural, eletricidade ou combustíveis fósseis).

Idealmente utilizado em lugares frios, nos quais existe uma grande diferença entre a temperatura do coletor e a do ambiente, esta tecnologia aproveita não só a absorção solar direta, como nos casos dos painéis térmicos com coletores planos, mas também a radiante. O seu coeficiente de perdas muito baixo torna este sistema bom para o aproveitamento da radiação solar difusa, ou seja, o sistema tem um bom funcionamento durante as 24h dos dias mais frios ou parcialmente nublados. É de notar que, estas condições climatéricas adequam-se às verificadas no arquipélago da Madeira, tornando este sistema propício para investimentos e emprego nalguns edifícios públicos da RAM, como por exemplo, em piscinas ou outros locais que necessitem de aquecimento de água/ambiente [6].

As vantagens de utilização de painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo são:

- Instalação rápida e alinhamento solar fácil – Mesmo com baixa radiação solar o painel funciona prontamente;
- Não necessita de manutenção técnica exceto uma limpeza periódica dos tubos de vácuo, para remover quaisquer impurezas ou sujidades que provoquem perda de eficiência;
- Elevada durabilidade – O tempo de vida médio de um sistema deste género, nas condições de funcionamento normais, é superior a quinze anos;
- No caso de quebra de um tubo de vácuo, o sistema continua a funcionar e a sua substituição é simples;
- Reduz a dependência a sistemas de aquecimento tradicionais e consequentemente as emissões de GEE;
- Elevada resistência a temperaturas negativas ou positivas elevadas, permitindo a sua utilização 24h por dia, sete dias por semana, durante todos os meses do ano [6].

2.5.2.2 Painéis térmicos com coletores solares planos

Os painéis solares térmicos com coletores planos têm a função principal de aquecer águas sanitárias. Este tipo de sistema aquece tipicamente até 80% das necessidades de água quente de uma habitação de maneira barata recorrendo unicamente a energia solar. Estes sistemas também podem auxiliar no aquecimento central e de piscinas mas com uma eficiência menor que os painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo nos dias mais frios/nublados.

A nível de funcionamento, este tipo de tecnologia pode utilizar os dois processos de aquecimento de água anteriormente descritos, nomeadamente, os Sistemas de Termossifão e de Circulação Forçada. Na figura 20 mostra-se um exemplo da tecnologia de Termossifão.
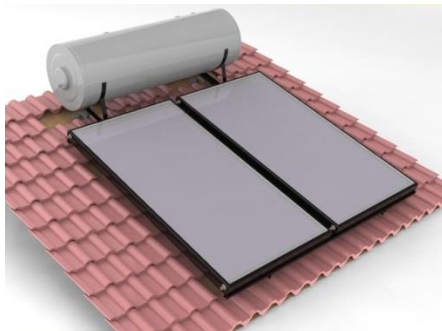
Figura 20 - Sistema solar térmico de coletores planos, com o sistema de termossifão [27].

2.5.2.2.1 Constituição dos coletores solares planos

Os coletores solares planos são constituídos por uma placa absorvente, por uma cobertura transparente que permite a passagem da energia solar, minimizando as perdas térmicas do absorvente; por um fluido de transporte de calor (anticongelante, água ou ar) que está encarregue de extrair o calor dos tubos; e por fim uma secção traseira isolante. Na figura 21 mostra-se a constituição deste tipo de tecnologia.
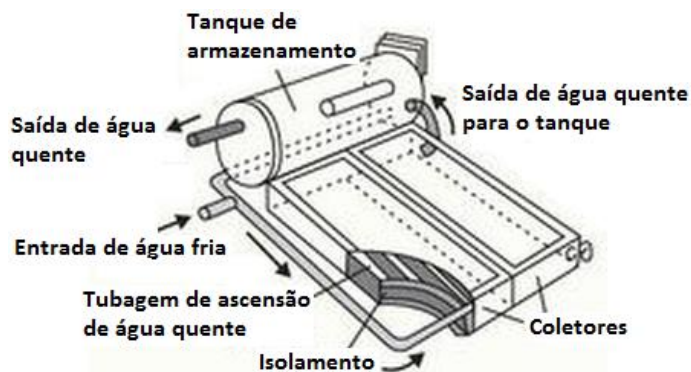
Figura 21 - Tecnologia solar térmica com coletores planos [28].

A placa absorvente é composta por uma folha fina (de polímeros estáveis termicamente, de aço, cobre ou alumínio) sendo revestida com um material escuro e suportada por uma grelha ou serpentina de tubagens.

O fluido no interior dos tubos circula através de motores elétricos alimentados pela pressão da água da rede pública, não sendo necessário uma bomba circulatória ou eletricidade com origem solar. É então que, o calor do absorvente é removido pelo fluido circulatório, passando este posteriormente pelas tubagens do depósito isolado de água, por meio de um permutador de calor ou diretamente [29].

2.5.2.3 Comparação das tecnologias de painéis térmicos

Para comparar-se as tecnologias de painéis térmicos com tubos de vácuo e os planos, apresenta-se um gráfico na figura 22 que compara os diferentes desempenhos destas tecnologias ao longo do dia.
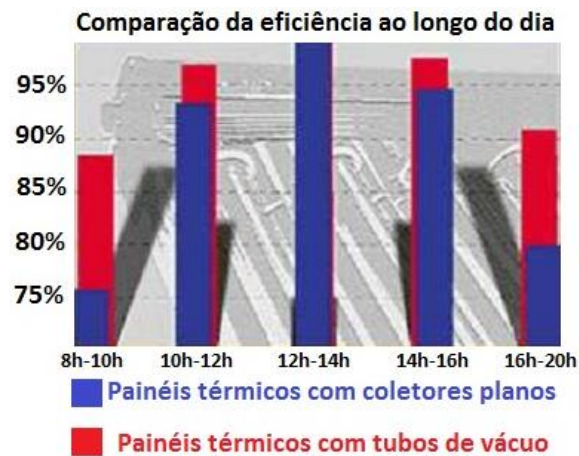
Figura 22 - Comparação dos desempenhos do painel solar plano VS painel de tubos de vácuo [6].

Pelo gráfico da figura 22 verifica-se que, no princípio da tarde (12h – 14h), quando a radiação solar atinge os valores máximos do dia, ambos os sistemas têm uma elevada eficiência (≈ 100%). Mas, fora deste período, nos quais os feixes de radiação solar não incidem diretamente nos painéis, verifica-se que os painéis térmicos com coletores de tubos de vácuo têm uma melhor eficiência que os painéis térmicos com coletores planos. Isto deve-se ao facto de os coletores de tubos de vácuo isolarem o fluido que contêm, prevenindo perdas de calor por condução logo aumentando a eficiência do coletor [6].

A figura 23 mostra como os tubos de vácuo têm uma melhor eficiência que os coletores planos ao longo do dia, durante os dias frios.
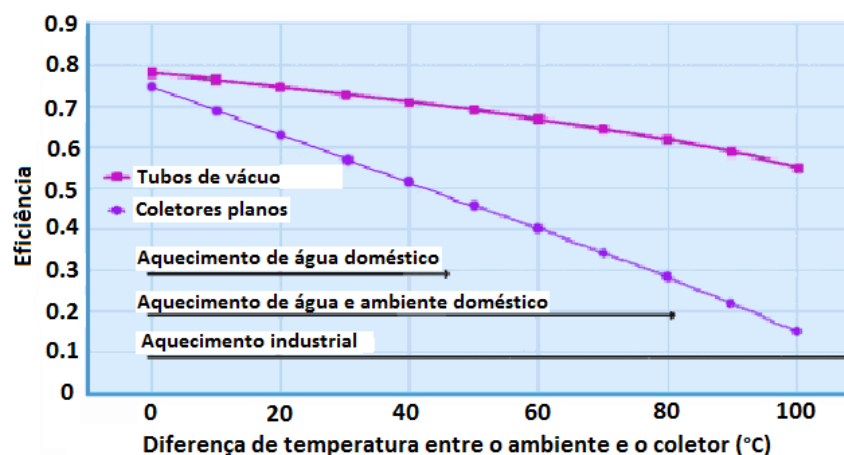
Figura 23 - Comparação dos desempenhos do painel solar plano VS painel de tubos de vácuo, em dias frios [6].

Pelo gráfico da figura 23 comprova-se que quanto maior a necessidade de água quente, maior o rendimento do sistema de aquecimento de água com a tecnologia de tubos de vácuo quando comparado com o sistema térmico plano e, a temperatura exterior ao tubo de vácuo pode ser muito baixa, em relação à temperatura do interior do tubo, que o sistema não deixa de ser eficiente [6].

2.6 Desenvolvimentos futuros

Ao nível da tecnologia fotovoltaica, foi formalizado no dia 23 de Fevereiro de 2013, a implementação do contador bidirecional em unidades de microprodução e miniprodução, através do decreto-lei n.º 25/2013 aprovado na Assembleia da República (AR) [14].

Este tipo de contador é colocado nos FV e funciona de duas formas, como o próprio nome indica, sendo que, quando o painel produz energia elétrica excedente e envia-a para a rede pública, o contador regista toda a energia enviada para a rede. A outra forma de funcionamento diz respeito a, quando os painéis fotovoltaicos não conseguem suprimir todas as necessidades do edifício, a

energia da rede pública complementa com a energia em falta e em resultado o contador regista o valor. Ou seja, basicamente o contador bidirecional (dois sentidos) regista o consumo e produção num só componente elétrico.

Brevemente será aprovado um outro decreto-lei que introduzirá o conceito do contador bidirecional em unidades de autoconsumo, contendo todas as condições e parâmetros de utilização.

Para a tecnologia de painéis térmicos há, mais recentemente, os tubos solares híbridos que geram eletricidade e aquecem água. Para tal, esta tecnologia combina o melhor da tecnologia fotovoltaica com a tecnologia solar térmica, a partir de um único tubo híbrido, designado de *Virtu Tube* [30]. A figura 24 mostra o aspeto geral desta tecnologia.

Figura 24 - Exemplo da inovadora tecnologia *Virtu Tube* [30].

2.7 Programas computacionais utilizados

Para simulação das diversas soluções/cenários de implementação utilizaram-se três programas de computação, designadamente o Quantum GIS Lisboa (QGIS), o Solterm e o RETScreen Plus.

Estes programas foram os selecionados para o desenvolvimento desta tese porque, para o caso do *software* de SIG, a identificação dos edifícios públicos com exposição e dimensão apropriada para a instalação de sistemas solares só foi possível utilizando este programa, selecionando os edifícios públicos com as caraterísticas ideais. Ou seja, edifícios com boa exposição solar, sem sombreamentos, orientados a Sul, com inclinações adequadas, áreas livres para as instalações solares, etc. A seleção deste programa específico surgiu como recomendação da DROTA, através do Eng.º Luís Antunes, correspondendo às expetativas iniciais e revelando-se uma ferramenta poderosa para a realização desta tarefa e muitas outras relacionadas com os SIG.

Segundo o decreto-lei n. 80/2006 Anexo VI, no qual foi introduzido o RCCTE, o programa SolTerm foi introduzido como a única ferramenta reconhecida para o cálculo da contribuição de sistemas de coletores solares para o aquecimento da AQS [31]. Assim, as agências bancárias utilizam este *software* para determinar se um projeto solar térmico específico é viável ou não, autorizando um empréstimo em caso afirmativo.

O facto de a Universidade da Madeira apenas possuir uma licença para o *software* SolTerm, relativa ao concelho do Funchal, limitou a pesquisa de edifícios públicos com a dimensão e exposição solar apropriada para a instalação de sistemas solares térmicos. Da análise feita à parte de simulação dos sistemas fotovoltaicos no SolTerm, detetou-se que este é muito limitado e com algumas deficiências no seu funcionamento. Estas limitações são ao nível da oferta de escolha dos PV e inversores, tipos de configurações de FV, análises de risco, entre outras. As deficiências observadas foram:

- Erros nos cálculos com o modificador de ângulo de incidência para a radiação direta;
- Guardar e recuperar a informação sobre o sistema FV dimensionado;

- Ecrã persistente/bloqueado, seguido de encerramento do programa;
- Simulação e processos de execução muito lentos e problemáticos.

Para contornar este contratempo, optou-se pelo *software* premiado RETScreen como ferramenta de simulação dos FV, estando disponível gratuitamente através da Internet e com boa afirmação na área das energias renováveis, principalmente em FV. Recomendado por várias empresas de sucesso neste ramo, este programa de simulação surgiu como a alternativa mais credível das originalmente propostas. Assim, recorrendo a esta ferramenta, foi possível simular os diferentes cenários de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, dimensionados nos casos de estudo analisados na parte mais avançada deste trabalho.

A partir das simulações desenvolvidas com estes programas, sobre FV e térmicos, foi possível realizar análises em várias áreas de interesse, nomeadamente, análise financeira, análise de custos, análise de emissões, análise de risco, orçamentos de alguns dos sistemas solares dimensionados, entre outras. Através destas análises foi possível verificar a viabilidade das diversas soluções apresentadas, retirando todas as conclusões acerca do potencial solar dos edifícios públicos da RAM.

É de salientar que, todos estes programas foram fulcrais para o desenvolvimento desta tese, uma vez que, neles assentam os pontos mais importantes e baseiam as conclusões finais da mesma.

2.7.1 *Software* Quantum GIS Lisboa

Tendo por base os objetivos iniciais da tese, mais especificamente, a identificação dos edifícios de dimensão e exposição solar apropriada, baseou-se a escolha dos edifícios públicos apropriados recorrendo às ferramentas disponíveis no programa QGIS.

Este *software* possui uma interface gráfica muito intuitiva e fácil de utilizar, disponibilizando várias opções como, a determinação de declives, inclinações, cotas, entre muitos outros. Este é muito utilizado por engenheiros responsáveis pelo Ordenamento do Território e Ambiente e por consultores de projetos das diversas áreas relacionadas com o território.

O QGIS suporta um conjunto de dados vetoriais, tendo a possibilidade de, no caso de não aceitar algum formato, poder-se inserir facilmente um plugin no programa para que o mesmo o possa executar/ler.

Este *software*, quando aplicado ao contexto desta tese, permite criar, visualizar, consultar e analisar dados geoespaciais. Estes dados referem-se à informação acerca da localização geográfica de uma determinada entidade. Para tal, é necessário o uso de coordenadas geográficas, como o valor da latitude e longitude [32].

Com este tipo de aplicação é possível visualizar num ecrã de computador ou numa página impressa, através rendering e informações geoespaciais, mapas estáticos (simples imagem) ou mapas dinâmicos, que podem ser personalizados pelo utilizador através das ferramentas presentes no ambiente do programa. Seguidamente, apresentam-se algumas das análises típicas, incluídas nas ferramentas de computação:

- Distâncias entre duas localizações geográficas;
- Calcular o valor das áreas (por exemplo, em m^2) dentro de uma região geográfica específica;
- Saber quais as características geográficas que se sobrepõem a outras características;
- O valor (por exemplo, em metros) de sobreposição entre as características;
- Número de localizações dentro de uma distância específica de outra localização [32].

Estas são algumas das operações que se efetua neste tipo de *software*. Estas podem parecer simplistas mas podem ser aplicadas em várias matérias de muitas disciplinas e são, muitas vezes,

tarefas complexas. Os resultados das análises podem ser visualizados no mapa ou em tabelas presentes num relatório de suporte à gerência de decisões.

Para criar um novo projeto é necessário introduzir os dados matriciais e vetoriais das zonas que se pretende analisar, sendo neste caso, o Funchal e a Calheta. Estes dados têm a designação de Ortofotomapas e Modelo Digital Terrestre (MDT) (Informação geográfica requisitada, cedida pela Direção Regional do Ordenamento do Território e Ambiente - DROTA).

Um ortofotomapa é basicamente uma fotografia aérea da qual foram extraídas todas as distorções causadas pela inclinação da câmara e relevo. A sua escala é uniforme, daí que, este pode ser utilizado como um mapa [33].

Um MDT é um conjunto de dados em formato numérico que, para uma determinada área, permite associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude [34]. Estes dados são fundamentais nesta aplicação de processamento de dados geográficos porque são os responsáveis pela maior parte das tarefas disponíveis na aplicação (áreas, declives, etc.). Estes modelos são obtidos através da amostragem do fenómeno dentro da região de interesse. Posteriormente, as amostras são processadas de maneira a criar modelos digitais que representam a variação do fenómeno na região examinada [34].

Na figura 25 mostra-se um exemplo do ambiente gráfico do programa QGIS, mais concretamente durante o processo de adição do ficheiro dos ortofotomapas.
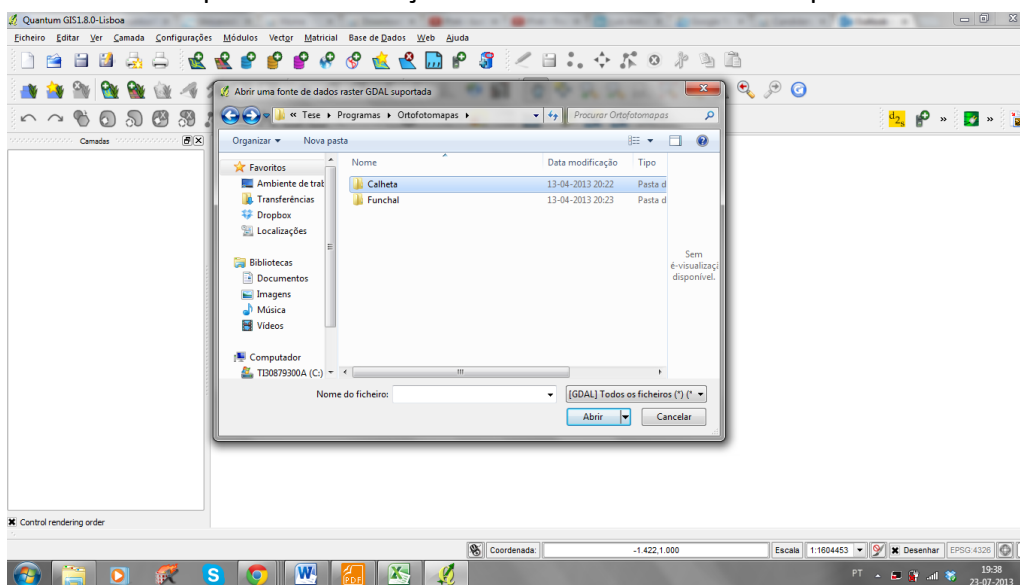
Figura 25 - Ambiente gráfico do *software* QGIS.

A utilização deste programa no processo de identificação dos edifícios públicos para instalação dos FV dimensionados inibe a consulta física ao local de instalação dos PV, uma vez que fornece aos instaladores todos os dados que necessitam [35].

2.7.2 *Software* SolTerm

A análise dos desempenhos dos sistemas solares térmicos dimensionados foi realizada no programa SolTerm, via simulação energética sob condições quase estáticas. Ou seja, foram simulados os balanços energéticos no sistema em intervalos pequenos (5 minutos), considerando o estado do ambiente e sistema constantes. Para simular qualquer sistema térmico neste programa, temos que inserir as seguintes informações:

- Dimensionamento / Configuração do sistema;
- Estratégias de controlo e operação;
- Radiação solar horizontal e temperatura ambiente em base horária;

- Obstruções, sombreamentos, relevo das redondezas, turbidez da atmosfera;
- Características técnicas dos componentes (coletores solares, tubagens, armazenamento, etc.);
- Consumo ou carga do sistema em base horária média mensal [36].

Os resultados das simulações de um sistema solar permitem obter o seu pré-dimensionamento, uma vez que, são fornecidas no programa algumas ferramentas de otimização automática sob vários critérios energéticos. O programa disponibiliza também uma análise económica e uma análise de benefícios Energia-Ambiente, designadamente da dispensa de recursos de origem fóssil e das emissões de GEE evitadas através do uso de sistemas solares. Este *software* gera relatórios de outras áreas, nomeadamente, relatórios da climatologia, das análises de desempenho energético, económico e ambiental [36].

Existem bases de dados de uso interativo para o clima e para os diferentes componentes dos diferentes sistemas solares, térmico e fotovoltaico. No entanto, os parâmetros de alguns componentes são fixos, com realce para os coletores térmicos e as cargas térmicas padrão do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [36].

O *software* SolTerm serve de guia para o cálculo de incentivos governamentais à energia e é uma ferramenta indicada para um amplo e diverso grupo de profissionais e outros interessados em energia solar, nomeadamente, agências de energia, particulares, câmaras municipais, fabricantes, projetistas e instaladores de sistemas solares [36]. A figura 26 mostra a interface gráfica do *software* SolTerm.
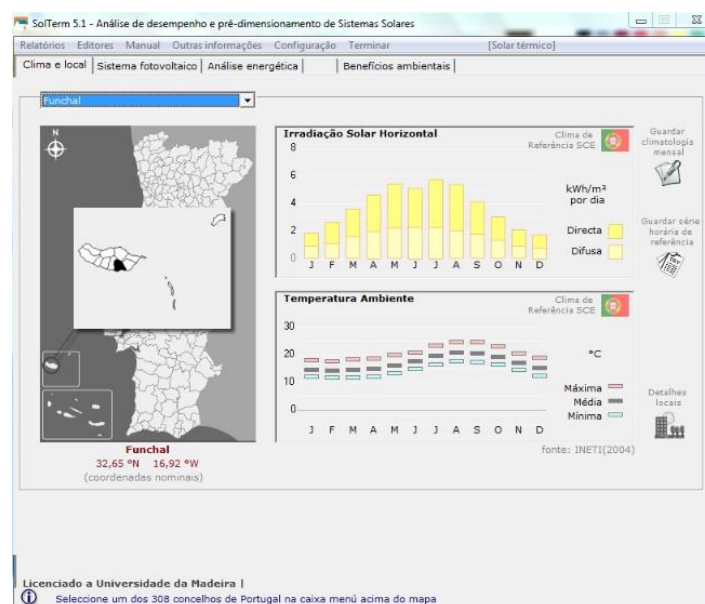
Figura 26 - Exemplo da interface gráfica do programa SolTerm.

2.7.3 *Software* RETScreen 4

Este programa foi escolhido como alternativa ao programa de simulação SolTerm, de maneira a disponibilizar uma solução mais exata ao FV a implementar em cada caso. Além de ter sido recomendado, devido a algumas lacunas do *software* SolTerm, o RETScreen é mundialmente utilizado por muitas empresas do sector de energias renováveis, tendo sido distinguido com muitos prémios em diversas áreas de inovação e desenvolvimento, sendo o último o *Energy Globe* – Prémio Nacional do Canadá.

A figura 27 mostra a interface gráfica desta ferramenta de simulação, sendo esta muito intuitiva e baseada no programa Excel.
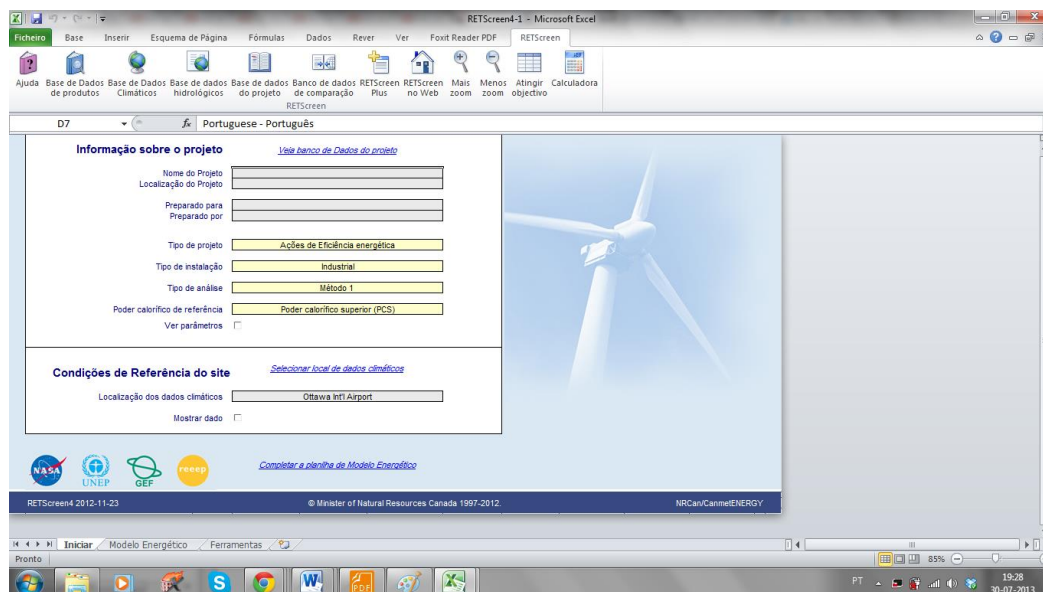
Figura 27 - Interface gráfica do *software* RETScreen 4.

As principais características do *software* RETScreen são:

- Desenvolvimento de um conjunto de novos modelos para avaliar as medidas de eficiência energética para edifícios residenciais, comerciais e institucionais;
- Expansão da base de dados climáticos para 6.700 localizações de estações terrestres ao redor do globo e incorporação da melhorada tecnologia da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, designadamente, *NASA Surface Meteorology and Solar Energy*, para áreas povoadas, estando diretamente inseridas no *software* RETScreen;
- Expansão das capacidades dos modelos existentes para avaliar tecnologias emergentes, como por exemplo, a corrente oceânica e a energia das ondas (ondomotriz) [37].

2.8 Conclusão

Neste segundo capítulo tentou-se enquadrar as energias renováveis no contexto da energia, em geral, e da energia elétrica, em particular. Como esta tese está orientada para a produção de energia elétrica a partir de energias renováveis, abordou-se genericamente as principais tecnologias que, nesta perspetiva, se apresentam como sendo as mais relevantes, nomeadamente, a hídrica, solar e eólica, mas dando mais enfase à energia solar.

No contexto regional, das energias renováveis descritas nos subcapítulos anteriores, nota-se que a energia hídrica está bem inserida e é, há muito tempo, competitiva; a eólica está em fase adiantada de investimento numa perspetiva de grande e contínua expansão, tendo sido alvo de forte investimento nos últimos quatro anos por parte da EEM, através de uma remodelação dos aerogeradores por outros com maior potência e débito nominal, e reforço dos recursos humanos para manutenção das mesmas; já a energia solar está relativamente a dar os primeiros passos no processo de introdução na rede elétrica, prevendo-se ainda muitas mudanças a este nível, principalmente na redução de preços e custos das instalações fotovoltaicas nos próximos anos.

As outras energias renováveis, como por exemplo a energia proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos, apesar dos seus elevados potenciais, não têm sido vistas como uma aposta forte neste sector de energias designadas "limpas", exceto a energia ondomotriz, tendo esta sido, recentemente, mencionada pelo Secretário do Ambiente e dos Recursos Naturais, Manuel António Correia, como uma futura aposta e deixando antever um possível investimento nesta área.

Nesta tese, em que o tema principal diz respeito às energias renováveis, mais especificamente a energia solar, foi necessário dotar o leitor com alguns dados estatísticos e provas

dadas por aplicações de sucesso nas diversas áreas de energias renováveis, para que ajude a perceber o posicionamento das fontes renováveis no mundo, em Portugal e nas suas diferentes Regiões Autónomas, principalmente, no contexto do sector elétrico.

Assim, as informações mais importantes a reter são: as tecnologias para explorar a energia solar/fotovoltaica têm os créditos firmados no mercado mundial; o preço das instalações nunca foi tão reduzido; e, a nível europeu, os incentivos para o investimento são imensos, chegando a ser comparticipados até 50% do capital inicial do investimento.

A partir da análise à radiação solar na RAM verifica-se que os valores apresentados nos mapas de radiação solar coincidem com os valores medidos nas estações de superfície (tabelas 5 e 6), apesar de apresentarem alguns desvios inteiramente aceitáveis.

Assim, da análise dos mapas de radiação solar diária e média anual, pode-se afirmar que a Ilha da Madeira tem condições gerais muito propícias para a utilização deste recurso, uma vez que, em termos gerais, valores acima dos 4 kWh/m^2.dia apresentam-se genericamente atrativos para o investimento/aproveitamento de energia solar fotovoltaica ou até mesmo térmica [8]. Logo, afirma-se que na maioria da Ilha da Madeira (superior a 75%) a energia solar é um recurso energético renovável endógeno, com muito interesse de exploração.

Ao nível do estudo realizado sobre as eficiências dos módulos fotovoltaicos, verificou-se que as mesmas aumentaram ao longo dos anos, tendo estabilizado nos 15% aproximadamente, para painéis de uso geral (1ª geração), ou seja, os mais utilizados devido à sua boa relação entre a eficiência/preço. De momento, a tecnologia de filme fino (2ª geração) está a se revelar muito promissora devido à sua eficiência (≈ 11%) e aos pequenos custos que apresenta (≈ 1 €/Wp), derivados de materiais e custo de fabricação baixos [2].

Devido às diversas necessidades energéticas atuais dos edifícios públicos, foram tidas em consideração outras formas de aproveitamento da energia solar, sem recorrer à sua vertente elétrica. Após um estudo do atual mercado, observou-se que a tecnologia dos painéis térmicos colmatava algumas das necessidades fundamentais de vários prédios públicos, como o aquecimento da água de piscinas durante as horas de maior utilização.

Esta alternativa teve em conta o contexto socioeconómico atual, baseando a sua escolha na sua utilidade, fiabilidade, custo, desempenho e retorno. Além de se adaptarem perfeitamente às condições (instalação, necessidades, etc.) dos edifícios públicos a implementar.

Foram também apresentados os programas usados para a simulação dos desempenhos dos sistemas solares térmicos, FV e para a localização dos edifícios com dimensão e exposição solar apropriada.

Capítulo 3 - Seleção dos edifícios de dimensão e exposição solar apropriada

3.1 Introdução

Neste capítulo são identificados os edifícios públicos que possuem maior potencial solar para um posterior investimento num sistema solar. É através desta seleção que se determina qual o sistema solar que melhor se adequa às necessidades energéticas e condições de determinado local, como por exemplo, as suas dimensões, restrições, o nível de insolação ou radiação solar.

A posição ou localização das instalações de qualquer sistema solar é fundamental quando a intenção é implementá-lo em qualquer edifício, seja doméstico, comercial ou até mesmo industrial. Como tal, a escolha segue vários critérios rigorosos, sempre com o objetivo de obter a melhor colocação possível, de forma a obter o máximo rendimento possível durante todo o seu período de utilização.

O processo de seleção dos edifícios que possuem as melhores condições para usufruir dos sistemas solares selecionados neste trabalho, teve os seguintes critérios:

- O edifício tinha que ser público;
- Maior área disponível/livre para a instalação do sistema solar;
- Níveis de radiação solar nos locais a instalar sistemas solares, os mais elevados possíveis;
- Níveis de temperaturas;
- Orientação dos edifícios;
- Evitar zonas de sombreamento significativas;
- Orientação das áreas disponíveis para as instalações solares.

O cuidado com os níveis de pó, devido a construções, indústria ou qualquer tipo de atividades desse género, vizinhas ao prédio escolhido, também foi considerado.

Além disso, foram tidos em conta outros fatores de escolha que, apesar de não serem muito importantes, não deixam de ser pertinentes para levar a cabo a identificação dos edifícios públicos apropriados para receber os sistemas solares. Como exemplo disso, foram tidas em consideração as superfícies de instalação, de forma a minimizar ao máximo qualquer alteração, construção extra ou até mesmo estrutura de suporte muito complexa, no local de instalação do sistema solar.

Outro condicionante foi o facto de tentar colocar a instalação do sistema solar, seja ele fotovoltaico ou térmico, num local de fácil acesso, de maneira a facilitar as manutenções e a realização das mesmas nas melhores condições de segurança possíveis e, a sua fixação perdure segura durante todo o tempo de vida do sistema.

A correta identificação dos prédios, bem como dos sistemas solares a instalar, conferem ao mesmo várias benesses, de forma direta ou indireta, sendo:

Diretamente:

- Redução de custos de materiais de construção;
- Redução nas contas de eletricidade ou até mesmo a anulação destas;
- Geração de energia para venda.

Indiretamente:

- Imagem ecológica;
- Publicidade associada à instalação dos sistemas solares;
- Melhoria da qualidade e fiabilidade energética;
- Redução do risco do aumento do preço da energia;
- Redução do consumo de energia (em 10% mínimo, normalmente).

É importante referir que os programas RETScreen e SolTerm estão preparados para calcular os efeitos de sombreamento e poluição, graças à possibilidade de refinamento de detalhes dos locais para o dimensionamento dos FV e sistemas térmicos, tendo estes um efeito preponderante nos resultados finais.

Devido à limitação da licença disponível e dos dados de radiação para os *softwares* SolTerm e RETScreen, respetivamente, só se tem acesso aos dados da cidade do Funchal para o dimensionamento dos sistemas térmicos e fotovoltaicos.

3.2 Identificação dos edifícios públicos

O processo de identificação dos prédios públicos foi realizado tendo em conta três parâmetros propostos inicialmente: a grande extensão da RAM; o elevado número de edifícios públicos da RAM; e a limitação do *software* de simulação. Para se solucionar, as áreas de escolha dos edifícios públicos foram limitadas ao concelho da Calheta e à cidade do Funchal, dando maior primazia/interesse aos estabelecimentos escolares, devido à maior quantidade de informação disponível para análise e estudo, posteriormente.

Esta decisão foi tomada, com base em pilares fundamentais para o suporte, desenvolvimento e utilidade, a curto prazo desta tese. Estes pilares foram diversos, nomeadamente, o interesse suscitado pelas instituições em pôr em execução algumas das soluções apresentadas nesta tese de mestrado, o clima socioeconómico, as ajudas ou apoios dados para o desenvolvimento e instalação de projetos de sistemas solares em áreas de menor desenvolvimento, a imagem ecológica transmitida, assim como a publicidade e mão-de-obra associada.

Procedeu-se à seleção dos edifícios públicos que cumpriam com os parâmetros anteriormente mencionados. Para tal, foram introduzidos os ortofotomapas de 2010 dos municípios do Funchal e Calheta, MDT com resolução de 10 metros e Pontos de Interesse (*POI): "Governo Regional", "Escolas", "Saúde";* no *software*, sendo necessário realizar os próximos procedimentos. É de referir que, o MDT com resolução espacial de 10 metros significa que o tamanho do *pixel (ou célula)* adotado para este trabalho é 10 metros.

Através dos seguintes passos foi introduzido o MDT na biblioteca do programa Quantum GIS:

- Na barra de ferramentas do programa abriu-se o separador "Camada";
- Escolheu-se a opção "Adicionar Camada Matricial";
- Na janela "Abrir uma fonte de dados raster GDAL suportada" foi selecionado e aberto o ficheiro "MadeiraMDT_10.asc";
- Na janela "Seletor de Sistema de Coordenadas de Referência" foi adotado o sistema de referência de coordenadas "*WGS* 84";

O sistema de referência de coordenadas adotado é o utilizado atualmente, nomeadamente o elipsoide Sistema Geodésico Mundial (*WGS*) 84, que tem sido melhorado (3ª versão) mas nunca alterado na sua base. O número 84 diz respeito ao ano em que este sistema foi modificado, sendo referente ao ano 1984. O *WGS* 84 é um sistema tridimensional de coordenadas simples, comum, ortogonal e acessível, verificando-se uma utilização crescente de informação proveniente de satélites, principalmente através do Sistema de Posicionamento Global (*GPS*) [38].

Por defeito o MDT é apresentado na interface do Quantum GIS renderizado como "Banda cinza simples", ou seja, é necessário definir um esquema de cores para identificar os diferentes relevos/altitude ao longo de toda a ilha da Madeira. Para tal, seguiu-se o seguinte procedimento:

- Na barra de ferramentas selecionou-se o separador "Ver";

- Neste separador selecionou-se "Painéis" e ativou-se a opção "Camadas";
- No novo painel "Camadas", abriu-se as propriedades do ficheiro "MadeiraMDT_10";
- Na janela "Propriedades da camada – MadeiraMDT_10", abriu-se o separador "Estilo" e, no quadro "Propriedades de bandas simples", selecionou-se as seguintes opções:
    - Banda Cinza: Banda 1;
    - Mapa de cor: Mapa de cores.
- De seguida abriu-se o separador "Mapa de cores" e introduziu-se as diferentes altitudes/entradas no quadro "Mapa de cor", através do botão "Adiciona entrada", personalizando cada altitude em valor (metros), cor e etiqueta.
- Por fim aplicou-se todas as alterações efetuadas ao ficheiro através do botão interativo "*Apply*".

A figura 28 apresenta o esquema de cores eleito para o MDT da ilha Madeira, assim como a legenda das cores com a altitude correspondente em metros (Coluna Valor).
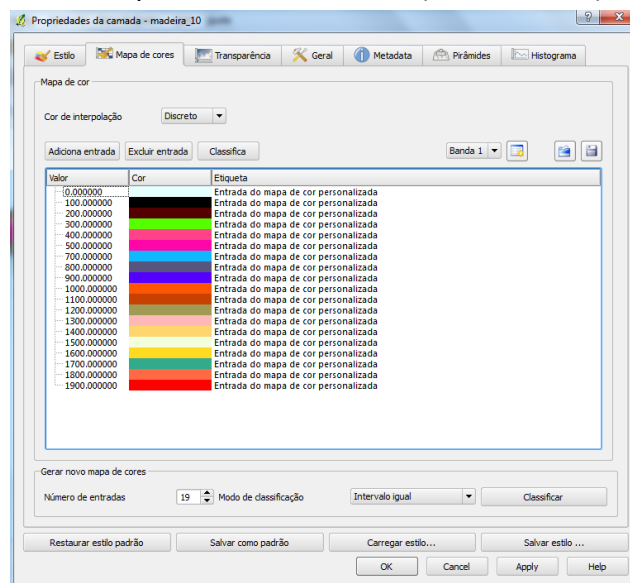
Figura 28 - Esquema de cores implementado no MDT.

A figura 29 apresenta o MDT da ilha da Madeira, de acordo com os seus diferentes relevos.
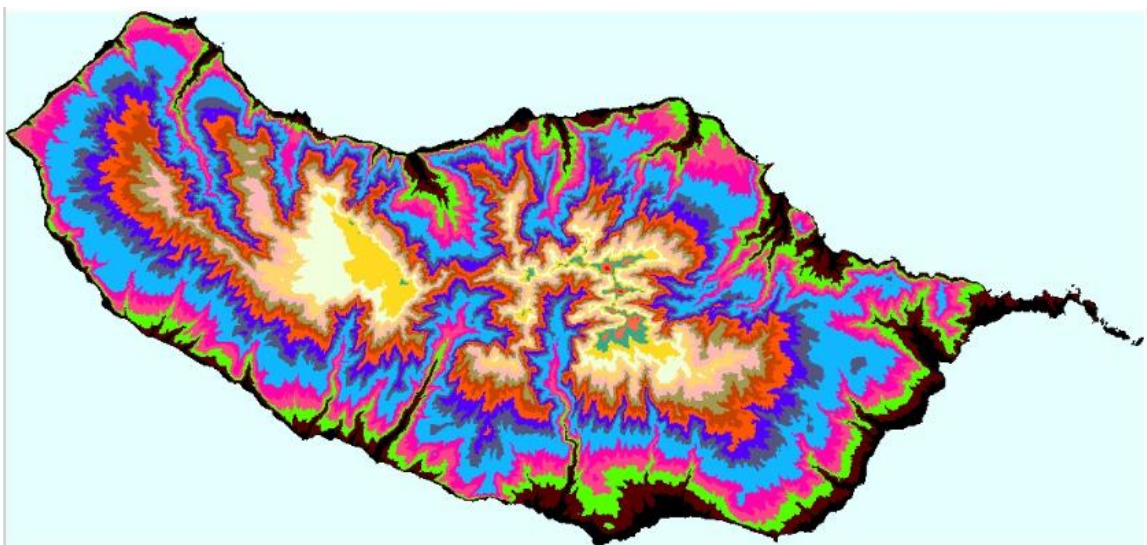
Figura 29 - MDT da ilha da Madeira.

Posteriormente foram adicionados os ortofotomapas mas, antes foi necessário instalar o plugin "OpenLayers" uma vez que os formatos dos ficheiros dos ortofotomapas (sid e sdw) não eram reconhecidos pelo *software*. Para tal, realizou-se os seguintes passos:

- Na barra de ferramentas do *software* Quantum GIS, selecionou-se o separador “Módulos” e clicou-se na opção “Busca Complementos Python…”;
- Na janela “Instalador de Complemento Python”, assinalou-se a opção “OpenLayers Plugin”;
- Por fim, clicou-se nos botões “Instalar complemento” e “Fechar”.

Para introduzir os ficheiros dos ortofotomapas na biblioteca do programa realizou-se o seguinte procedimento:

- Na barra ferramentas abriu-se o separador “Camada” e adicionou-se uma nova camada matricial através da opção “Adicionar Camada Matricial”;
- Selecionou-se e abriu-se todos os ficheiros dos ortofotomapas do Funchal;
- Na janela “Seletor de Sistema de Coordenadas de Referência” foi adotado o sistema de referência de coordenadas “*WGS* 84” para todos os ficheiros selecionados.

Posteriormente os três últimos passos anteriores foram repetidos mas com a adição dos ficheiros dos ortofotomapas do município da Calheta.

Finalmente foram adicionados os ficheiros *POI* com as localizações dos prédios públicos fornecidos (escolas, proteção civil, hospitais, governo regional, centros de saúde, farmácias, parafarmácias), sendo que para tal foram efetuados os seguintes passos:

- Na barra de ferramentas do programa abriu-se o separador “Camada”;
- Escolheu-se a opção “Adicionar Camada Vetorial”;
- Na janela “Adicionar camada vetorial”, selecionou-se a opção “Ficheiro” do quadro “Tipo de fonte”;
- No quadro “Fonte”, selecionou-se os ficheiros POI para inserir no “Conjunto de dados”, através do botão “Exibir”;
- Finalizou-se esta ação de inserção dos POI através do botão “Open”.

A figura 30 exemplifica o projeto final que contém os ortofotomapas e MDT da Madeira, utilizado no processo de identificação dos prédios públicos.
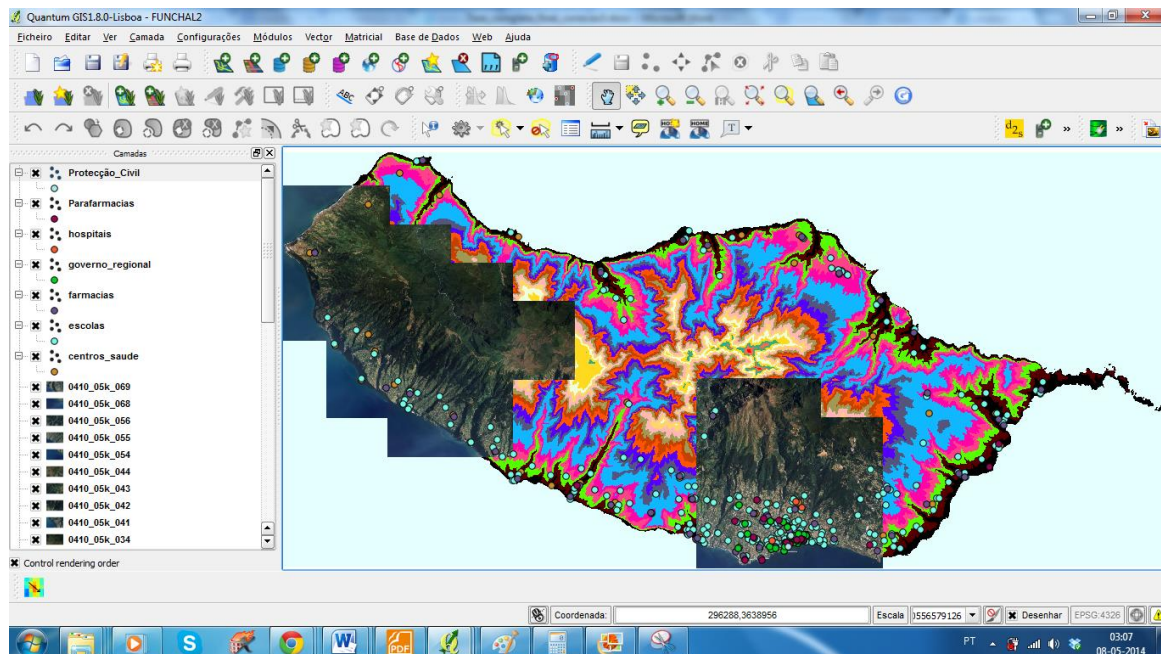
Figura 30 - Projeto criado com os ortofotomapas, MDT e POIs da ilha da Madeira.

Com o MDT e os Ortofotomapas em execução no programa QGIS foi possível então avançar com o processo de identificação dos edifícios públicos com a melhor exposição solar possível e que se adequam ao conceito geral do tema da tese, a energia solar.

É importante referir que o MDT fornecido informa qual a cota de cada edifício identificado e, é a partir deste que é possível realizar os vários geoprocessamentos, como por exemplo, disposições, inclinações, declive, etc.

O facto de não ter sido fornecida a localização de muitos edifícios públicos, como as piscinas públicas, Centro das Artes, parques de estacionamento públicos, entre outros; tornou a tarefa de identificação e processamento (orientação, inclinação, etc.) mais árdua.

Com todos os dados carregados e processados, selecionou-se dentro da amostra de edifícios públicos os que satisfaziam as condições de dimensão e exposição apropriada para a instalação de FV no Funchal. Na secção 3.1 estão expressas as condições de seleção dos prédios públicos.

Posteriormente foram repetidos os passos mencionados anteriormente, de forma a selecionar os prédios públicos do concelho da Calheta que possuem as condições exigidas para a instalação de FV.

De seguida foram selecionados 19 estabelecimentos públicos, sendo que, sete destes são prédios com serviços gerais orientados para os cidadãos e os outros doze são estabelecimentos de ensino escolar. Os métodos utilizados passaram pelos seguintes passos:

- Delimitação da área de estudo a partir de dados das áreas do Funchal e Calheta, utilizando a ferramenta de consulta do QGIS para selecionar as áreas de interesse;
- A ferramenta Cortar foi utilizada para obtenção dos edifícios correspondentes à área de estudo;
- Posteriormente foi adotada como camada a ser cortada o *shapefile* da geografia do MDT, criando assim um novo arquivo com a geografia da área/edifício de interesse.

O arquivo criado tem a possibilidade de ser analisado noutros programas, de acordo com o formato selecionado, como por exemplo, em *softwares* do tipo Cad.

A metodologia aplicada no processo de identificação dos edifícios públicos atrás descrito foi a utilizada em diversos estudos, artigos e livros da área de SIG, nomeadamente, nos artigos "SIG aplicado a gerência de rede de distribuição elétrica rural da área litorânea de Utinga, Localizada nos Municípios do Conde e Alhandra - PB" [39], "Combining Google Earth and GIS mapping technologies in a dengue surveillance system for developing countries" [40], "Uso do Quantum GIS e Google Earth para delimitação e análise de áreas de preservação permanentes da sub-bacia do córrego Água Branca em Goiânia" [41] e no livro "A GIS decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production" [42].

É importante referir que, as áreas de instalação assinaladas nos prédios, foram selecionadas com o objetivo de minimizar o custo total da instalação do sistema solar a nível de estruturas de suporte, evitar zonas de sombreamento, boa exposição solar, orientação, fácil e seguro acesso, condições do piso, assim como, satisfazer as áreas necessárias para os FV dimensionados (153 e 77 m^2).

A primeira escolha para os prédios públicos com serviços gerais orientados para os cidadãos foi o edifício público da Direção Regional de Qualificação Profissional (DRQP), localizado na freguesia de Santo António e com uma distância à costa inferior a 2,1 km. Este edifício tem as seguintes informações:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°39'28 N;
  - Latitude = 16°56'35 O;
  - Altitude = 316 m;

- Área de construção = 9.179 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 420 m^2, sendo que, **$Área_1$ = 240 m^2** e **$Área_2$ = 180 m^2**.

A figura 31 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal, cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
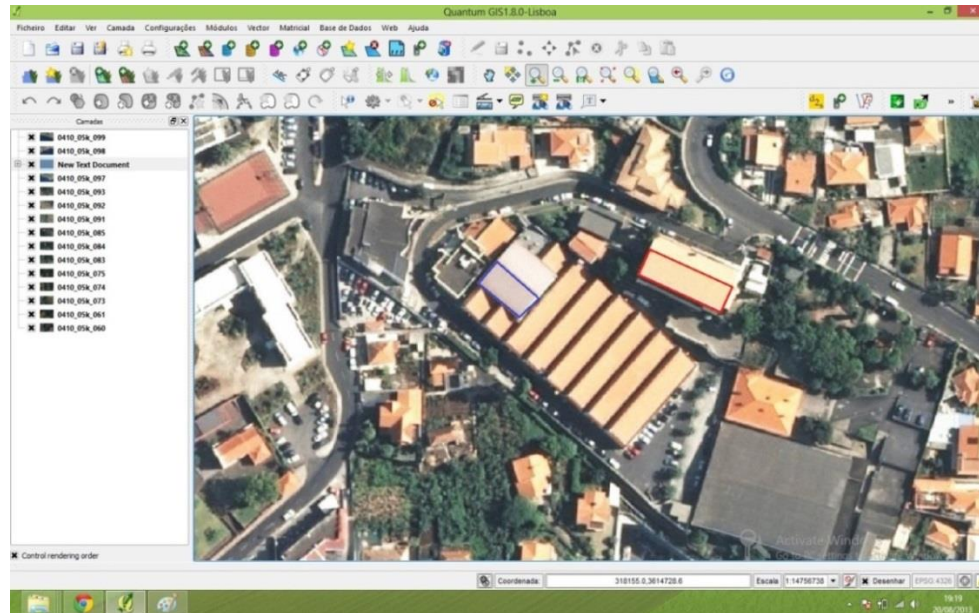
Figura 31 - Edifício da DRQP e os possíveis locais de instalação dos PV.

A segunda escolha recaiu sobre o edifício público da Direção Regional dos Assuntos Culturais (DRAC), localizado na Rua dos Ferreiros, Funchal e com uma distância à costa inferior a 680 m. Este edifício tem as seguintes informações:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°39’06 N;
  - Latitude = 16°54’39 O;
  - Altitude = 52 m;
- Área de construção = 696 m^2;
- Orientação do prédio = Noroeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 20° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 77 m^2**.

A figura 32 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
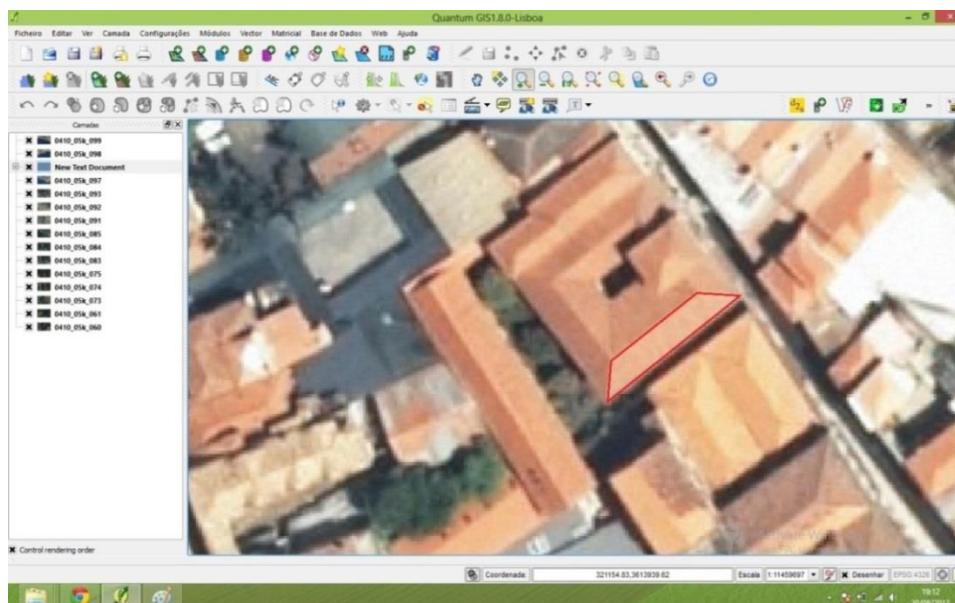
Figura 32 - Edifício da DRAC e os possíveis locais de instalação dos PV.

A terceira escolha recaiu sobre o Complexo Piscinas Olímpicas do Funchal, localizado no Beco dos Álamos - Santo António, Funchal e com uma distância à costa inferior a 2,8 km. Este complexo tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°39’54 N;
    - Latitude = 16°55’59 O;
    - Altitude = 240 m;
- Área de construção = 8.500 m^2;
- Orientação do prédio = Sudeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 5;
- Área de instalação total possível ≈ 551 m^2, sendo que, **5*$Área_1$ = 110 m^2**.

A figura 33 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
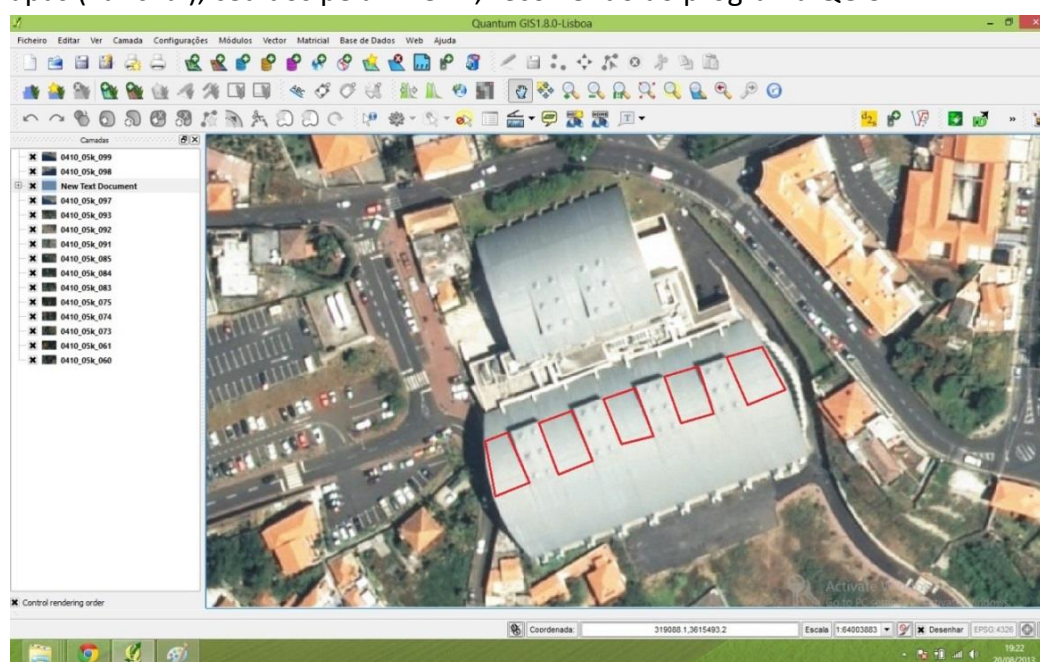
Figura 33 - Complexo das piscinas olímpicas do Funchal e possíveis locais de instalação dos painéis térmicos.

É de salientar que este complexo é constituído por quatro piscinas, nomeadamente, uma piscina olímpica de 50 metros por 10 pistas, uma piscina de 25 metros, uma piscina para saltos e ainda uma outra para aprendizagem.

A quarta escolha foi o Edifício do Governo Regional, localizado na Avenida Zarco, Funchal e com uma distância à costa inferior a 275 m. Este edifício detém diversos serviços públicos e tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’53 N;
    - Latitude = 16°54’34 O;
    - Altitude = 29 m;
- Área de construção = 2.882 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 10° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 303 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 272 m^2** e **Área$_2$ = 30 m^2**.

A figura 34 apresenta o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
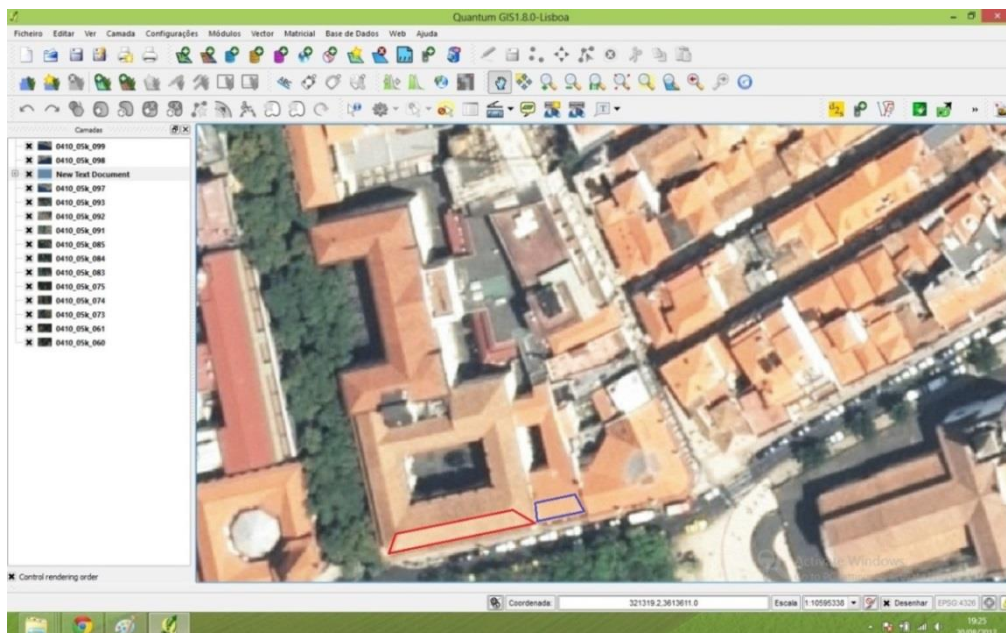
Figura 34 - Edifício do Governo Regional e possíveis locais de instalação de PV.

Posteriormente escolheu-se o prédio referente ao Edifício 2000, localizado na Avenida Calouste Gulbenkian, Funchal e com uma distância à costa inferior a 220 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’50 N;
    - Latitude = 16°54’56 O;
    - Altitude = 36 m;
- Área de construção ≈ 8.430 m^2;
- Orientação do prédio = Sudoeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;

- Área de instalação total possível ≈ 1.550 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 326,6 m^2** e **2*Área$_2$ = 612 m^2**.

A figura 35 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
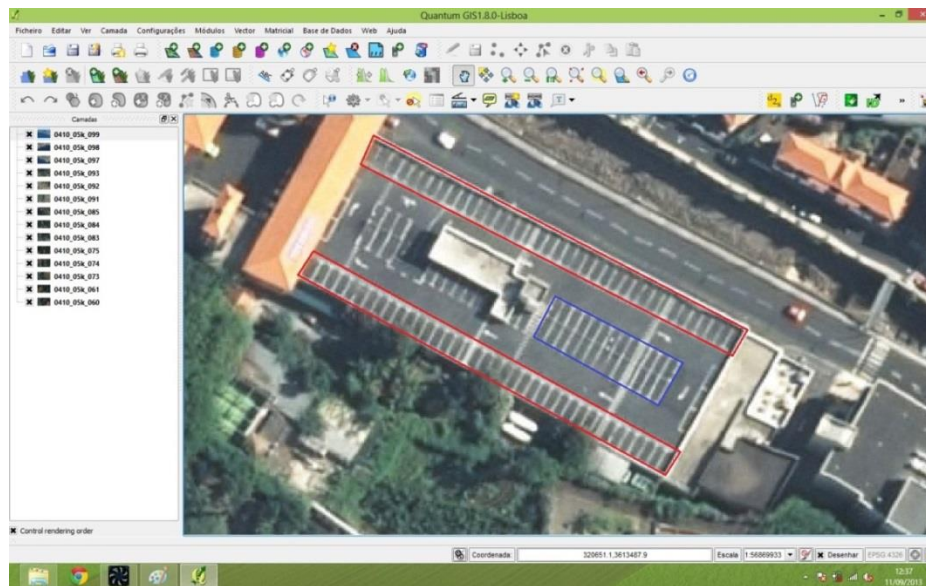
Figura 35 - Edifício 2000 e possíveis áreas de instalação de PV.

De seguida selecionou-se o edifício referente ao Hospital Dr. Nélio Mendonça, localizado na Avenida Luís Camões, Funchal e com uma distância à costa inferior a 740 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’55 N;
    - Latitude = 16°55’28 O;
    - Altitude = 107 m;
- Área de construção ≈ 23.940 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio inferior a 5° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 868 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 378 m^2** e **Área$_2$ = 490 m^2**.

A figura 36 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal (DROTA), recorrendo ao programa QGIS.
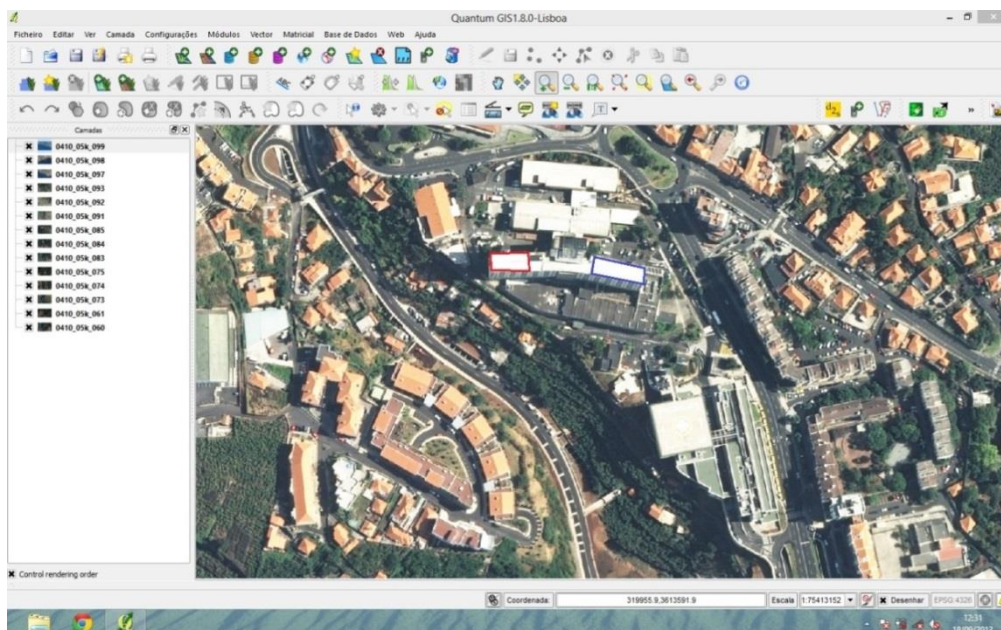
Figura 36 - Edifício do Hospital Dr. Nélio Mendonça e possíveis áreas de instalação de PV.

A nível de escolhas para os estabelecimentos de ensino escolar na RAM, primeiramente selecionou-se a Escola Jaime Moniz, estando a mesma localizada no Largo Jaime Moniz, Funchal e com uma distância à costa inferior a 275 m. Este edifício tem as seguintes informações:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’57 N;
    - Latitude = 16°54’04 O;
    - Altitude = 21 m;
- Área de construção = 27.914 m^2;
- Orientação do prédio = Oeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 5;
- Área de instalação total possível ≈ 2.450 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 1.538 m^2**, **2*Área$_2$ = 187 m^2**, **Área$_3$ = 87 m^2** e **Área$_4$ = 450 m^2**.

A figura 37 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
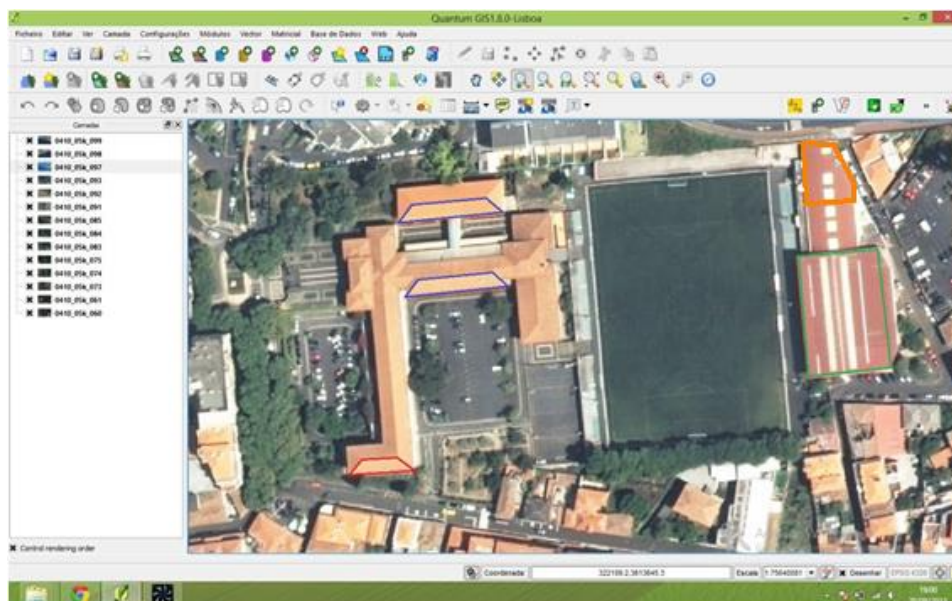
Figura 37 - Edifício do Liceu e possíveis áreas de instalação de PV e painéis térmicos.

É importante referir que, esta escola tem uma piscina ($Área_4$ = 450 m^2), assinalada a cor de laranja e que, possui aquecimento de água que utiliza tecnologias que recorrem a combustíveis fósseis para esse fim. Mais à frente desenvolve-se a possibilidade de instalação de sistemas solares neste tipo de estrutura.

Seguidamente selecionou-se o prédio de ensino referente à Escola Profissional Cristóvão Colombo, localizado na Avenida do Infante, Funchal e com uma distância à costa inferior a 177 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38'47 N;
    - Latitude = 16°54'49 O;
    - Altitude = 51 m;
- Área de construção = 425 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 79 m^2**.

A figura 38 apresenta o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal, cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
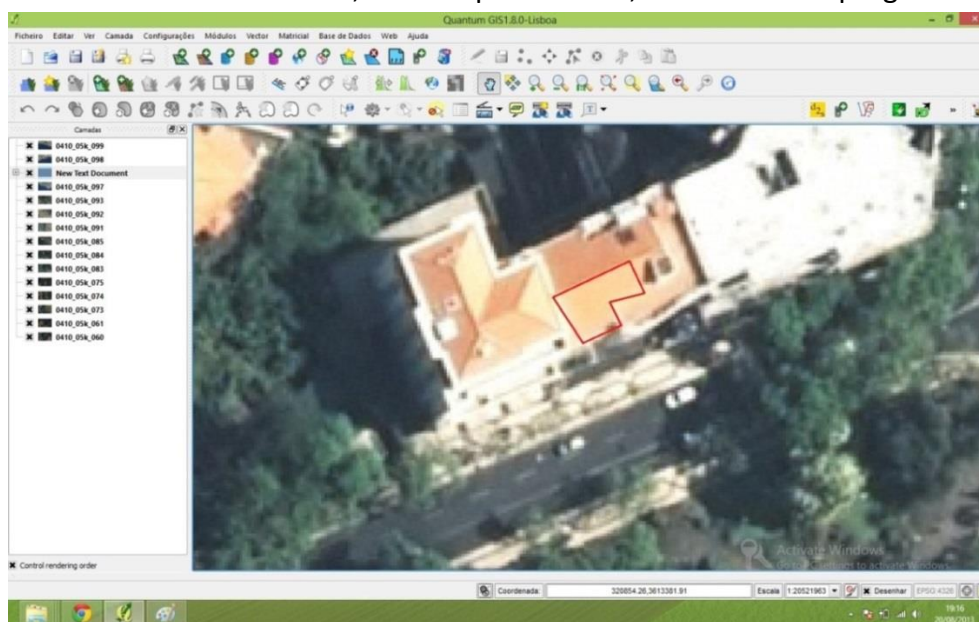
Figura 38 - Edifício da Escola Cristóvão Colombo e áreas possíveis de instalação de PV.

Para a próxima escolha selecionou-se o edifício referente à Escola Bartolomeu Perestrelo, localizado na Rua Bartolomeu Perestrelo, Funchal e com uma distância à costa inferior a 1,5 km. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°39'32 N;
    - Latitude = 16°54'54 O;
    - Altitude = 145 m;
- Área de construção ≈ 9.457 m^2;
- Orientação do prédio = Sudeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;

- Área de instalação total possível ≈ 2.102 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 1.679 m^2** e **Área$_2$ = 423 m^2**.

A figura 39 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
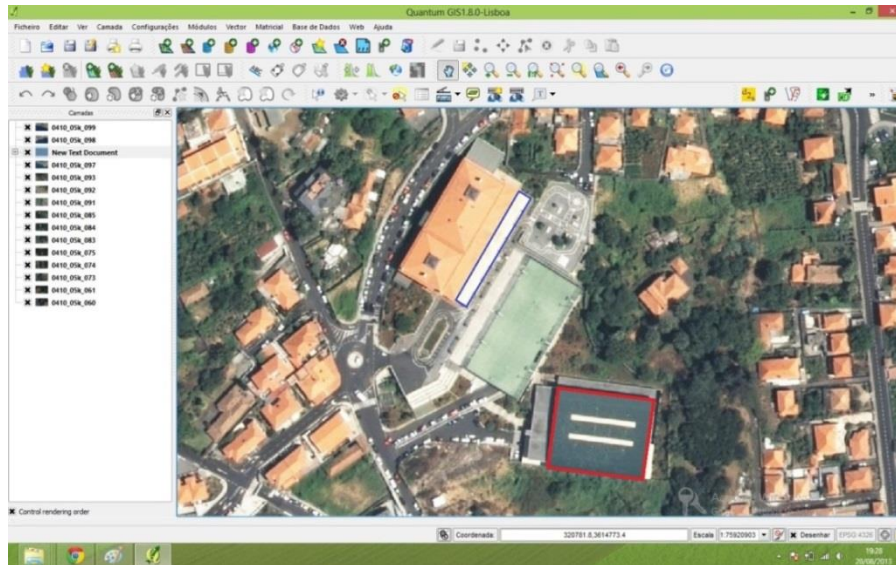
Figura 39 - Edifício da Escola Bartolomeu Perestrelo e possíveis locais de instalação de PV.

Seguidamente escolheu-se o edifício referente à Escola Horácio Bento, localizado na Estrada da Liberdade, Funchal e com uma distância à costa inferior a 975 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°38’59 N;
  - Latitude = 16°55’31 O;
  - Altitude = 110 m;
- Área de construção ≈ 17.220 m^2;
- Orientação do prédio = Sudoeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 10° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 903 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 409 m^2** e **Área$_2$ = 494 m^2**.

A figura 40 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal, cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
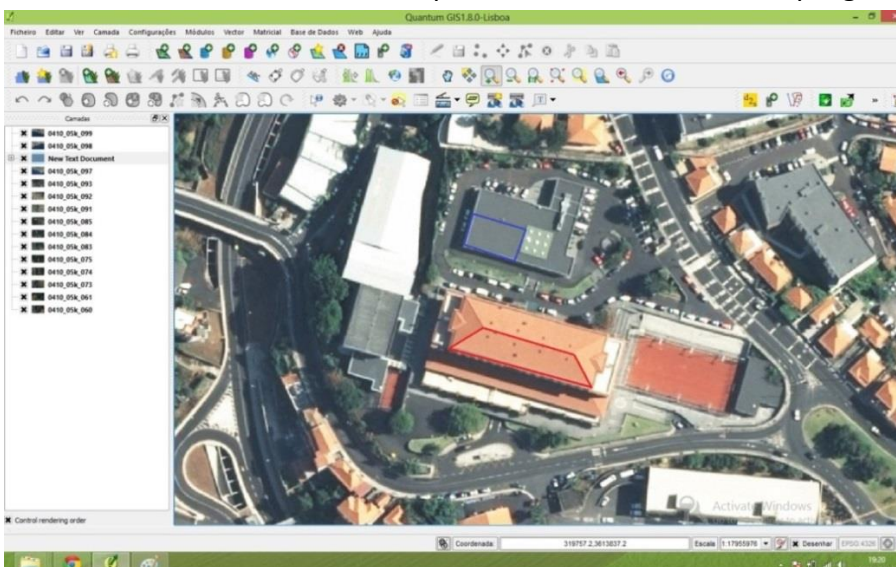
Figura 40 - Edifício da Escola H. Bento e possíveis áreas de instalação de PV.

Seguidamente selecionou-se o edifício referente à Escola Básica e Secundária Gonçalves Zarco, localizado no Caminho da Fé, Funchal e com uma distância à costa inferior a 850 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°38'52 N;
  - Latitude = 16°55'42 O;
  - Altitude = 119 m;
- Área de construção ≈ 13.950 m^2;
- Orientação do prédio = Sudeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 45° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 3;
- Área de instalação total possível ≈ 1.753 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 792,5 m^2**, **2*Área$_2$ ≈ 515,6 m^2** e **Área$_3$ = 444,6 m^2**.

A figura 41 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
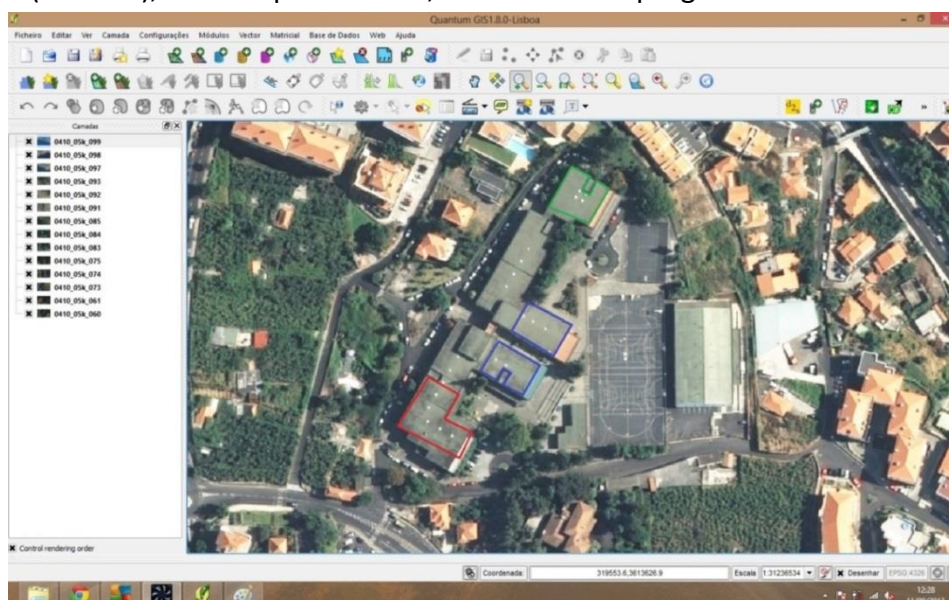
Figura 41 - Edifício da Escola Básica e Secundária Gonçalves Zarco e possíveis áreas de instalação de PV.

Posteriormente escolheu-se o edifício referente à Escola Básica de Santo António, localizado na Rua Quinta Josefina, Funchal e com uma distância à costa inferior a 1,78 km. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°39'25 N;
  - Latitude = 16°55'43 O;
  - Altitude = 180 m;
- Área de construção ≈ 6.555 m^2;
- Orientação do prédio = Sudeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 45° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 1.453 m^2**.

A figura 42 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
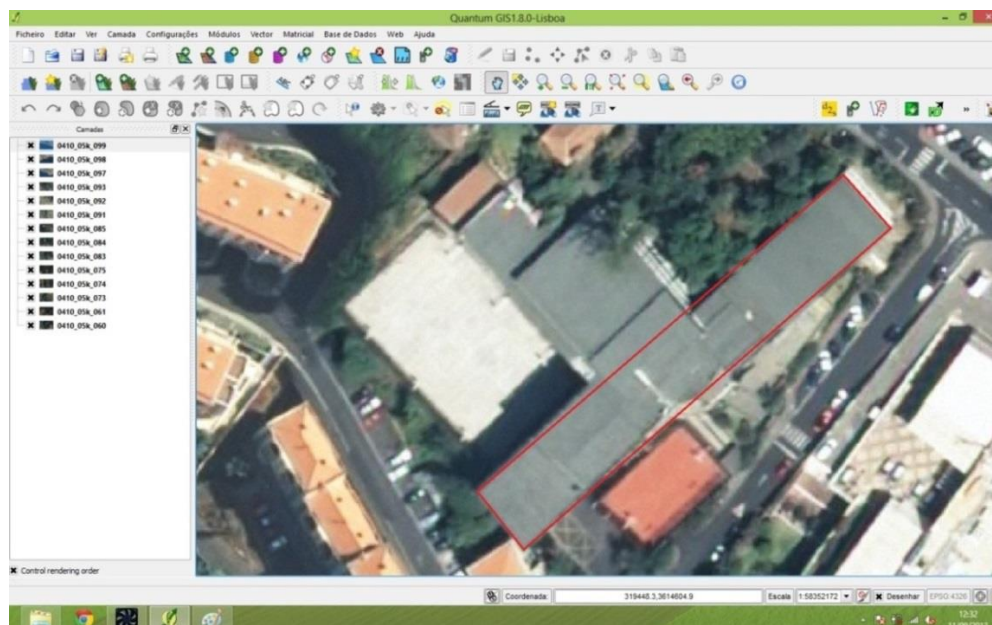
Figura 42 - Edifício da Escola Básica de Santo António e possíveis áreas de instalação de PV.

De seguida selecionou-se o edifício referente à Escola Básica dos Louros, localizado na Rua dos Louros, Funchal e com uma distância à costa inferior a 126 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
  - Longitude = 32°38'53 N;
  - Latitude = 16°53'31 O;
  - Altitude = 70 m;
- Área de construção ≈ 4.158 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 10° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 258 m^2, sendo que, **$Área_1$ = 174,3 m^2** e **$Área_2$ = 84 m^2**.

A figura 43 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
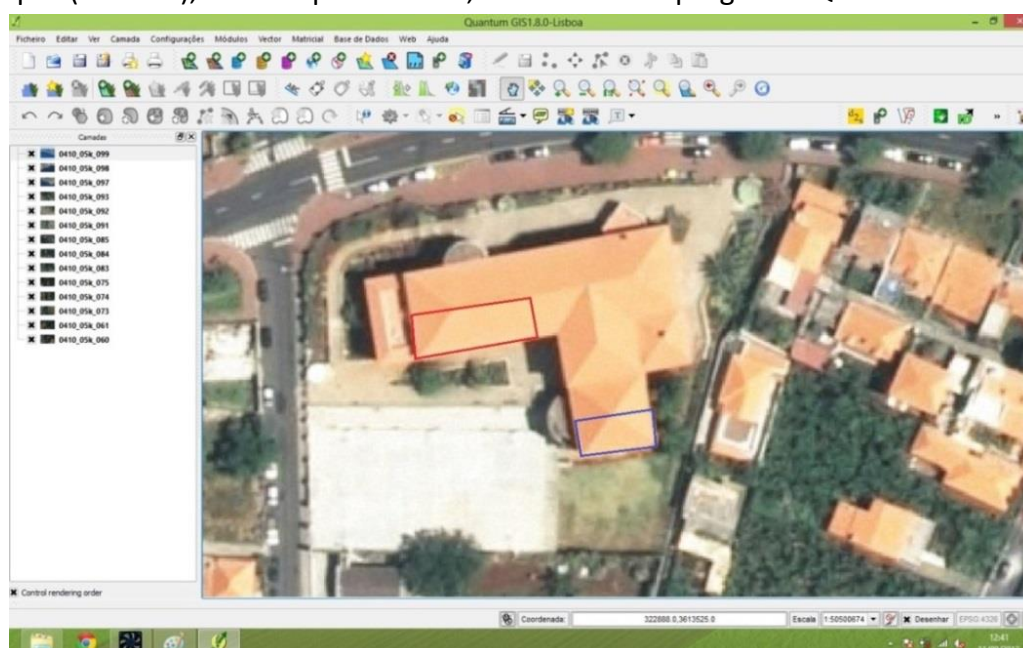
Figura 43 - Edifício da Escola Básica dos Louros e possíveis áreas de instalação de PV.

Posteriormente escolheu-se o edifício referente à Escola Secundária Francisco Franco, localizado na Rua João de Deus, Funchal e com uma distância à costa inferior a 540 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°39'07 N;
    - Latitude = 16°54'19 O;
    - Altitude = 37 m;
- Área de construção ≈ 15.500 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio inferior a 5° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 440 m^2**.

A figura 44 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal, cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
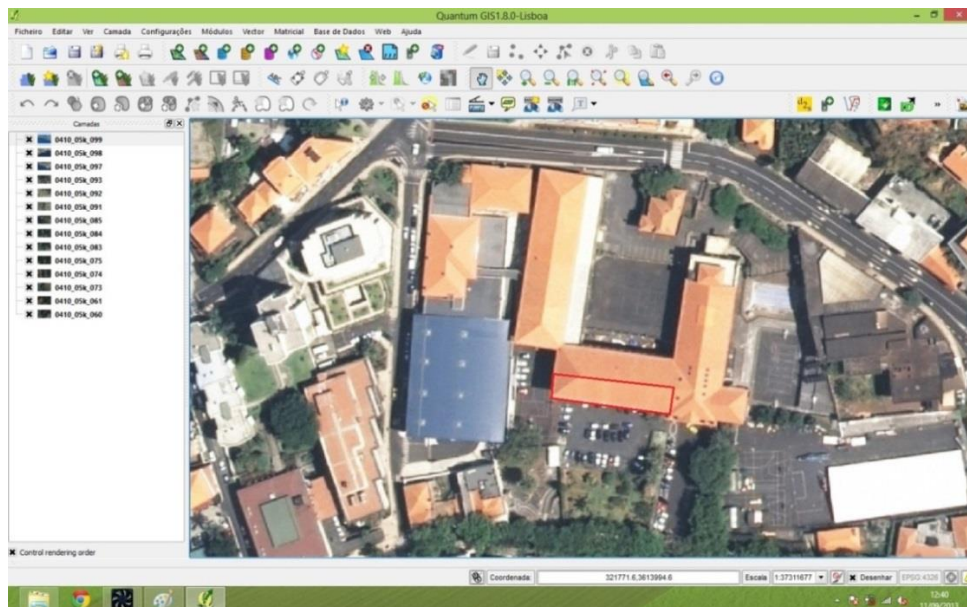
Figura 44 - Edifício da Escola Secundária Francisco Franco e possíveis áreas de instalação de PV.

De seguida selecionou-se o edifício referente à Escola Básica e Secundária Dr. Ângelo Augusto da Silva, localizado na Rua do Comboio, Funchal e com uma distância à costa inferior a 1,5 km. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°39'35 N;
    - Latitude = 16°54'32 O;
    - Altitude = 152 m;
- Área de construção ≈ 8.050 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 5° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 523 m^2**.

A figura 45 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
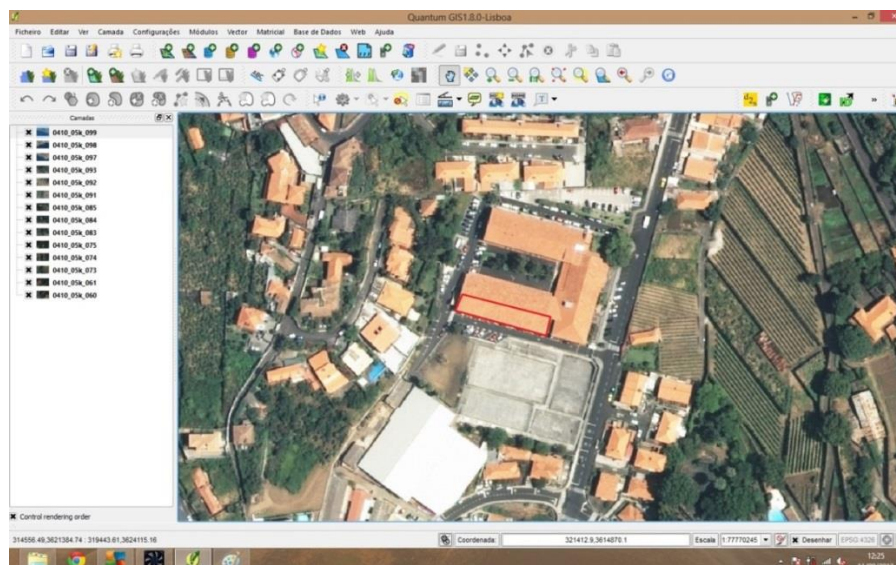
Figura 45 - Edifício da Escola Básica e Secundária Dr. Ângelo Augusto da Silva e possíveis áreas de instalação de PV.

Posteriormente escolheu-se o edifício referente à Escola Profissional de Hotelaria e Turismo da Madeira, localizado na Travessa dos Piornais, Funchal e com uma distância à costa inferior a 545 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’36 N;
    - Latitude = 16°56’52 O;
    - Altitude = 100 m;
- Área de construção ≈ 5.088 m^2;
- Orientação do prédio = Sudoeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 174 m^2**.

A figura 46 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas (Funchal), cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
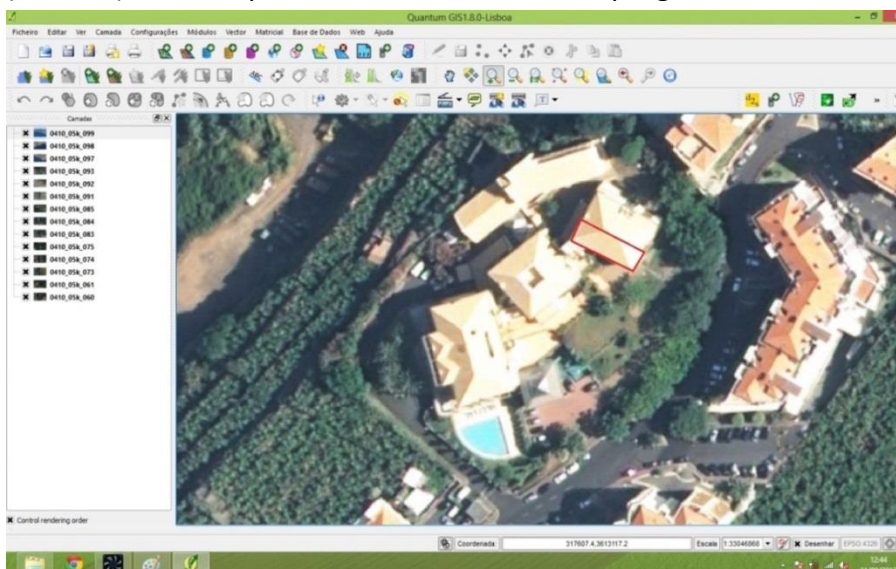
Figura 46 - Edifício da Escola Profissional de Hotelaria e Turismo da Madeira e possíveis áreas de instalação de PV.

De seguida selecionou-se o edifício referente ao Conservatório - Escola das Artes, localizado na Avenida Luís Camões, Funchal e com uma distância à costa inferior a 260 m. Este edifício tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°38’38 N;
    - Latitude = 16°55’20 O;
    - Altitude = 64 m;
- Área de construção ≈ 3.147 m^2;
- Orientação do prédio = Sul;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15° relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 1;
- Área de instalação possível **≈ 177 m^2**.

A figura 47 mostra o prédio atrás mencionado e caracterizado, visualizando-o através dos ortofotomapas do concelho do Funchal, cedidos pela DROTA, recorrendo ao programa QGIS.
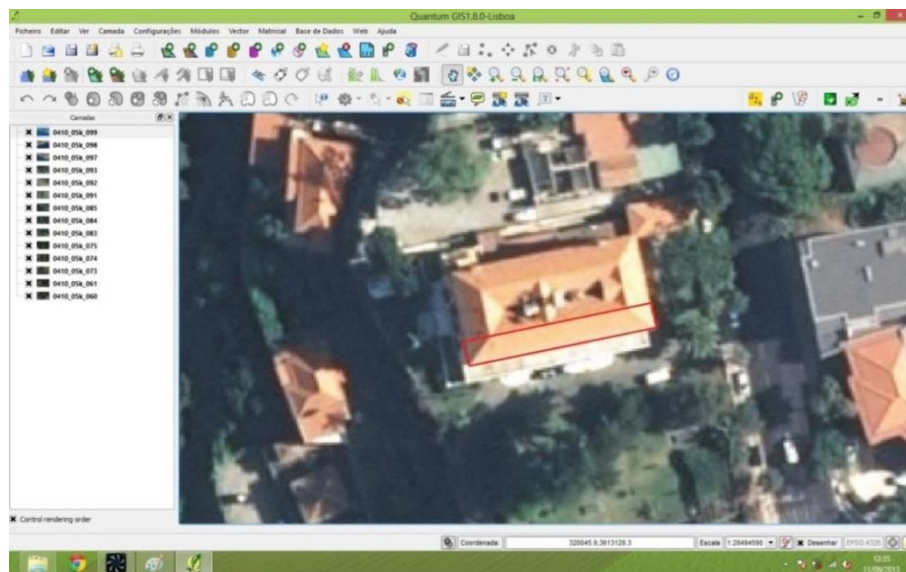
Figura 47 - Edifício do Conservatório - Escola das Artes e possíveis áreas de instalação de PV.

A próxima escolha recaiu sobre dois edifícios de particular interesse, designadamente a Escola Básica e Secundária da Calheta (EBSC) e o Centro das Artes Casa das Mudas, localizados na Estrada Simão Gonçalves da Câmara, Calheta e com distâncias à costa inferiores a 60 m. O edifício escolar tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°43’24 N;
    - Latitude = 17°10’52 O;
    - Altitude = 175 m;
- Área de construção ≈ 19.448 m^2;
- Orientação do prédio = Sudoeste;
- Orientação das superfícies de instalação = Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 3;
- Área de instalação total possível ≈ 2.964 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 258 m^2**, **Área$_2$ = 1.773 m^2** e **Área$_3$ = 934 m^2**.

O edifício do Centro das Artes tem as seguintes características:

- Coordenadas Geográficas:
    - Longitude = 32°43’23 N;
    - Latitude = 17°10’49 O;
    - Altitude = 149 m;

- Área de construção ≈ 5.895 m^2;
- Orientação do prédio = Este;
- Orientação das superfícies de instalação = Desvio de 15º relativamente ao Sul geográfico;
- Número de áreas de instalação possível = 2;
- Área de instalação total possível ≈ 789 m^2, sendo que, **Área$_1$ = 449 m^2** e **Área$_2$ = 340 m^2**.

A figura 48 apresenta os prédios atrás mencionados e caracterizados, visualizando-os através dos ortofotomapas do concelho da Calheta (DROTA), recorrendo ao programa QGIS.
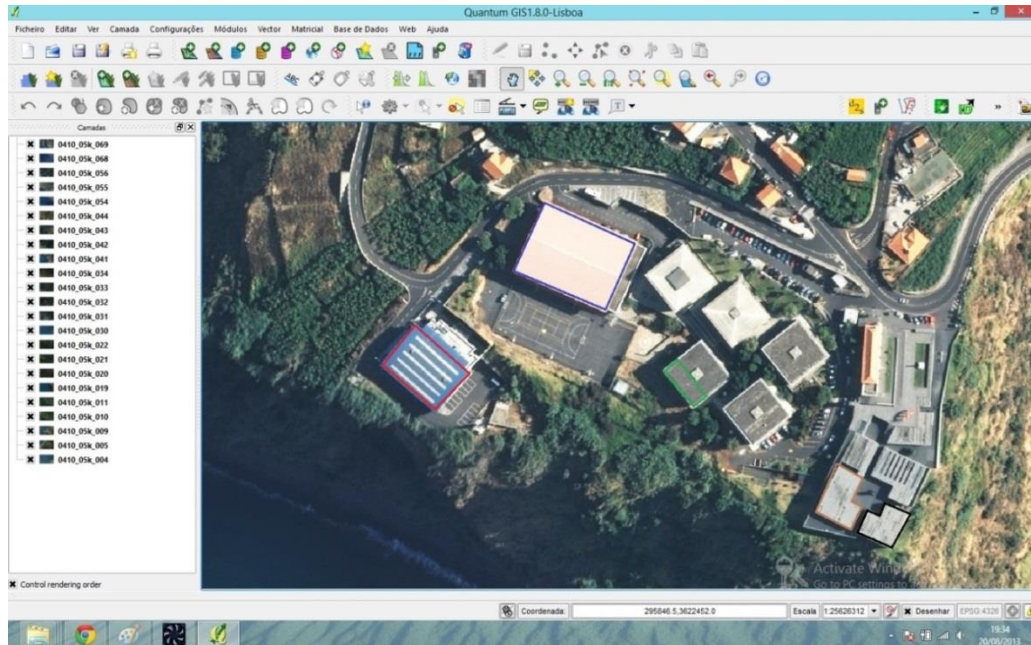
Figura 48 - Prédio da Escola Secundária da Calheta e Casa das Mudas, e possíveis áreas de instalação de PV.

Na figura 49 encontra-se um exemplo do sombreamento sobre o edifício público localizado na Rua 31 de Janeiro, nº 79, provocado por um prédio vizinho muito elevado. Este edifício alberga as seguintes entidades: PATRIRAM – Titularidade e Gestão de Património Público Regional, Direção Regional de Juventude e, Delegação Distrital da Fundação para a Divulgação das Tecnologias de Informática (FDTI) da Madeira.
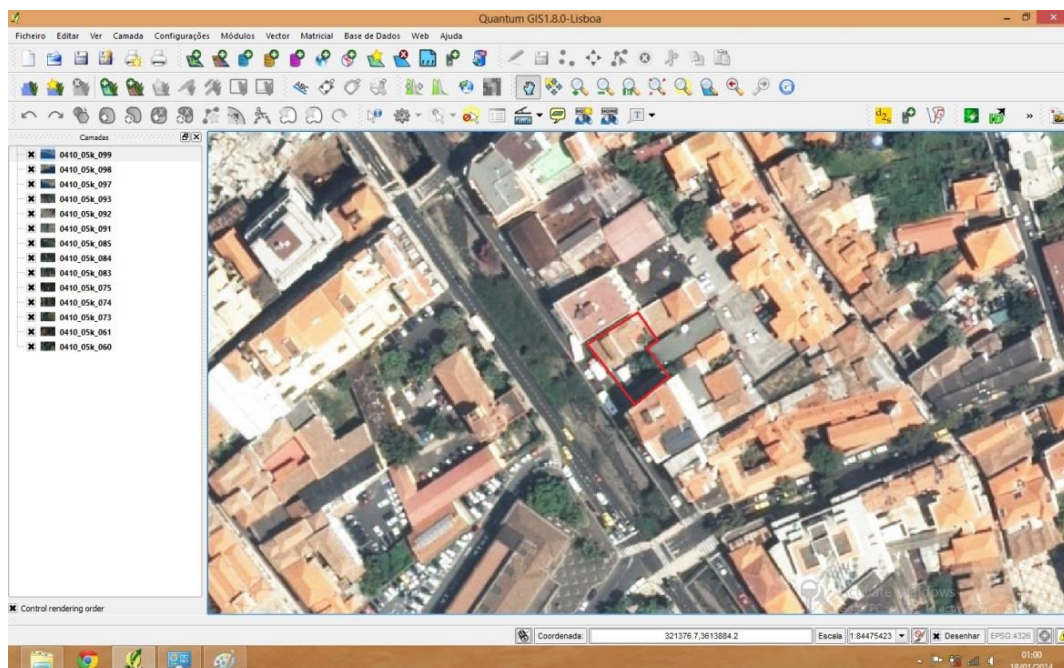
Figura 49 - Exemplo de sombreamento provocado por um prédio vizinho muito elevado.

3.3 Discussão de resultados

Verificou-se a importância de possuir uma ferramenta de SIG, particularmente na seleção e identificação dos prédios públicos da RAM com a dimensão e exposição solar apropriada para as diferentes tecnologias solares eleitas anteriormente. Com o auxílio desta poderosa ferramenta, foi possível filtrar todas as escolhas possíveis, de acordo com os sombreamentos a que estavam sujeitos os prédios, localização, altitude, inclinação e orientação das suas coberturas, entre outras.

Nesta fase, os estabelecimentos educativos da Ilha da Madeira tiveram primazia, pela simples razão de estarem em contacto direto com o carácter escolar desta tese e ter tido acesso a mais informações de conteúdo energético das mesmas, conseguindo desta forma, uma solução que melhor de adapta às necessidades energéticas dos prédios selecionados.

As escolhas das superfícies de instalação dos sistemas solares nos prédios selecionados, tiveram em conta os fins a que se destinam os prédios, ou seja, nos prédios escolares teve-se o cuidado de selecionar os locais mais isolados de forma a evitar possíveis despesas com equipamentos partidos ou avariados devido a atos involuntários de alunos ou outros acontecimentos. No caso da superfície de instalação escolhida no Edifício 2000, a instalação de um sistema solar permite poupar não só na fatura de eletricidade mas também fornece abrigo, a vários níveis (sombra, chuva, vento, etc.), às viaturas estacionadas no último piso do referido prédio, visto que, este não possui qualquer tipo de cobertura. Nos restantes prédios públicos, optou-se pelas superfícies de instalação tradicionais, designadamente, telhados e coberturas.

As superfícies de instalação foram selecionadas tendo em consideração a área mínima exigida pelas soluções de FV dimensionadas posteriormente e, as que oferecem menos adaptações/alterações à instalação das mesmas, evitando custos adicionais.

Os desvios das superfícies de instalação mencionados nas informações dos prédios selecionados são facilmente colmatados com pequenos ajustes e alterações na estrutura de suporte dos sistemas solares, orientando-os para o Sul geográfico.

De uma primeira análise aos consumos energéticos das escolas da RAM verifica-se que este ocorre principalmente durante o período diurno, no qual as despesas por kWh consumido rondam os 0,1336 €. Ou seja, a maior fatia de consumo de eletricidade provém deste período, normalmente designado por horas cheias. Posteriormente no Capítulo 5, na Secção 5.2.2, são analisados em pormenor estes casos específicos e quais as soluções que melhor se adaptam às suas necessidades.

O edifício escolar da EBSC e o prédio do Centro das Artes têm um interesse especial, devido ao facto de terem sido escolhidos propositadamente dois edifícios públicos num dos concelhos mais quentes, solarengos e com maior exposição de radiação solar da RAM. Estes localizam-se numa posição excelente ao nível de exposição solar constante devido ao facto de estarem num lugar privilegiado e elevado. Estas ilações surgem após a avaliação e verificação do local, sendo estes apropriados para instalações de sistemas solares, uma vez que, não possuem áreas de sombreamento de edifícios circundantes pois situam-se num penedo, sem a possibilidade de qualquer outra construção de prédios ou estruturas desse género ao seu redor.

Os pavilhões das piscinas, presentes nalguns edificados escolares, também têm um interesse particular devido à possibilidade de aplicação de sistemas térmicos para aquecimento das suas águas, minimizando substancialmente as despesas energéticas de algumas escolas da RAM, contribuindo assim para um edifício mais ecológico e para o bom funcionamento destas instituições públicas.

É importante referir que, durante o processo de identificação dos prédios públicos apropriados para a instalação de sistemas solares surgiram algumas dificuldades, devido:

- Inexistência de coberturas/telhados voltados para Sul;
- Telhados e espaços orientados para Sul, mas com excesso de sombreamento (figura 49);
- Telhados voltados para Sul, com uma estrutura frágil (a nível de segurança);
- Ter o cuidado com o facto de não violar qualquer condição de segurança de montagem ou funcionamento do sistema solar.

Capítulo 4 - Análise da oferta de painéis fotovoltaicos em termos de preço

4.1 Introdução

Quando se analisa FV existem vários parâmetros fundamentais a ter em conta para a sua seleção e aplicação em determinado projeto de energia solar, sendo o mais importante o custo.

Os módulos solares são soluções tecnológicas que já existem há muitos anos no mercado, sendo que, só na última década, se verificou um impulso forte no desenvolvimento e apresentação de novos módulos solares como meio de produção de energia elétrica através de energia solar. Este facto fez com que se apostasse e verificassem mais investimentos no sector dos painéis solares, tanto térmicos como fotovoltaicos, como uma alternativa à utilização de combustíveis fósseis para produção de energia térmica ou elétrica, respetivamente.

Estes últimos acontecimentos foram impulsionados pelos apoios, pesquisa, investigação e experiências levadas a cabo em nome do desenvolvimento de um sistema solar mais eficiente, económico e rentável a curto prazo. Estes incentivos ou ajudas para investigação partiram muitas vezes dos governos de vários países, de pólos de investigação de muitas universidades e de marcas muito conceituadas da área de energias.

Assim, surgiram novos equipamentos e dispositivos capazes de transformar energia solar em energia elétrica ou térmica. Como exemplo disso, podem encontrar-se os painéis solares em telas de borracha de Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) incorporada com lâminas de silício amorfo ou através de uma revolucionária impressora fotovoltaica, que imprime uma célula solar a cada dois segundos, do tamanho de uma folha de formato A3 [43].

Estas inovações e avanços na área da energia solar tiveram os seus efeitos nos parâmetros atrás mencionados, designadamente, nos preços associados aos módulos solares. Mas para se avaliar este parâmetro, foi necessário realizar um estudo exaustivo ao comportamento dos mesmos, para que se possam tirar algumas ilações sobre os seus comportamentos passados, atuais e possivelmente futuros, a curto prazo.

4.2 Análise do preço dos sistemas fotovoltaicos

Esta análise é muito complexa devido ao contexto em que se encontra, uma vez que, os preços dos módulos solares variam consoante o país e região em que se adquirem os mesmos. Mas pode-se fazer uma análise geral ao comportamento dos preços de forma global dos PV, podendo prever de certa forma a tendência futura dos mesmos, designadamente, se o preço irá aumentar, descer ou manter-se.

Antes de realizar uma análise mais concreta dos preços dos módulos solares, é obrigatório esclarecer o motivo dos preços elevados praticados no passado relativamente recente.

Olhando para o panorama mundial, há sensivelmente seis anos atrás, observou-se que existiam bastantes fabricantes de painéis fotovoltaicos mas, de células fotovoltaicas existiam muito poucos. Então, este grupo restrito de fabricantes de células solares impunha as suas condições, mantendo o seu monopólio e estipulando os preços que melhor os serviam (quase idênticos entre marcas). O crescente interesse mundial por PV fez com que os mesmos não suprimissem toda a procura, inflacionando assim os preços.

Na mesma altura, no princípio de 2007, no contexto nacional e regional, houve um apoio inicial através de bons subsídios, isenções, benefícios e regalias, por parte do Governo da República para estimular o mercado e incentivar os investidores a apostar em FV. Com o mercado de FV inserido, a partir de 2009, grande parte destes apoios foram reduzidos e outros retirados.

Consequentemente, deixou de ser rentável o investimento em FV devido à subida dos custos e dos cortes nos benefícios. Para inverter esta situação, foi tomada a decisão de produzir em grande escala células fotovoltaicas de forma a diminuir os custos dos FV, aumentando a sua procura e facilitando a entrada de novos fabricantes neste mercado. Esta ação teve consequências quase imediatas no mercado das tecnologias de energias solares, principalmente nos preços dos módulos solares que diminuíram.

Com o mercado estimulado e com vários fabricantes de células solares, a competitividade entre empresas aumentou consideravelmente, provocando uma descida constante, de aproximadamente 15 %/ano dos preços de FV, desde o ano 2007 até ao início de 2013. A partir de meados de 2013 até à presente data, verificou-se um pequeno abrandamento na descida de preços, antevendo uma futura estabilização de preços (figura 50).

Tendo em conta que os módulos solares constituem a maior fatia do investimento de uma instalação de painéis fotovoltaicos, para realizar um estudo geral dos preços dos mesmos, considerou-se a situação mais comum em Portugal: instalação fotovoltaica para microprodução com uma potência máxima de saída de 3,68 kW (metade da potência contratada para consumo). Este tipo de instalação foi a selecionada porque, além de se possuir os preços praticados desde o ano 2007, esta modalidade foi das primeiras a ser regulamentada.

O gráfico da figura 50 mostra a tendência decrescente dos custos de uma instalação fotovoltaica para microprodução (IVA incluído), assim como, a linha de tendência e a função que representa a evolução do preço dos equipamentos.
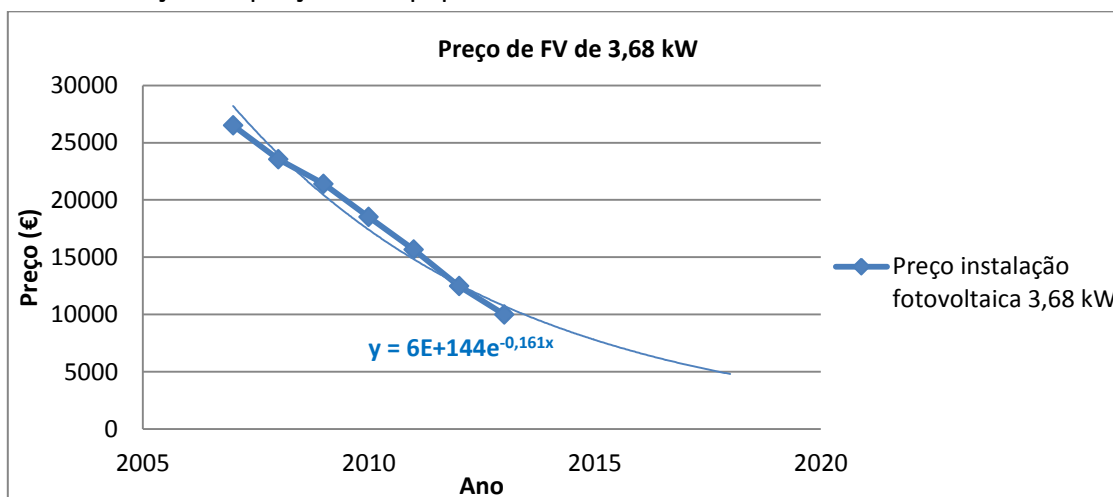
Figura 50 - Histórico de preços praticados na RAM para instalações de microprodução com 3,68 kW de potência.

Hoje em dia, uma instalação fotovoltaica desta dimensão custa aproximadamente 10.000€, segundo o gráfico da figura 50. A partir deste gráfico, verifica-se uma descida constante de preços das instalações fotovoltaicas, fruto da maior liberalização e diversificação do mercado, para valores muito mais cativantes para os investidores que os praticados em inícios de 2007. Para caracterizar este comportamento escolheu-se uma função exponencial de expoente negativo. Repare-se que não existem dados suficientes para construir um modelo mais detalhado mas esta função será muito mais adequada do que, por exemplo, uma equação de reta que significaria que em algum momento as instalações seriam gratuitas. Analisando a função da linha de tendência ($y = 6E+144e^{-0,161x}$) observa-se que, a curto prazo (≈ 4 anos), atingir-se-á o valor mínimo de 5.000€, a partir do qual, o preço das instalações fotovoltaicas se manterá aproximadamente estável.

É importante referir que, os preços praticados em Portugal Continental para este tipo de instalações são inferiores aos preços praticados na RAM, apesar do IVA ser 1% superior ao verificado

atualmente na RAM, registando uma diferença média de 2.000€. Esta diferença é justificada através dos encargos extras, como a logística envolvida (telefonemas e pedidos de informação) e custos da empresa vendedora, a nível de transporte de materiais e equipamentos para a RAM.

4.3 Análise do preço pago por cada kWh produzido/consumido

Desde muito cedo que a regulamentação acerca das instalações fotovoltaicas foi estabelecida através de decretos-leis. Mas a maior mudança, impulsionadora ou não, só foi evidente nos quatro últimos decretos-leis aprovados. De seguida, apresenta-se uma breve interpretação dos mesmos para se traçar a tendência do preço pago por kWh produzido.

A 2 de Novembro de 2007 foi aprovado o Decreto-Lei n.º 363/2007, que veio definir uma tarifa única de referência, em regime bonificado, de 0,65 €/kWh durante os 5 primeiros anos e para os primeiros 10 MW de potência de ligação registados a nível nacional. Por cada 10 MW adicionais de potência de ligação inscritos a nível nacional, a tarifa única aplicável é sucessivamente reduzida em 5%. Para o regime geral foi estipulado que a tarifa de venda de eletricidade é igual ao custo da energia do tarifário pelo comercializador de último recurso do fornecimento à instalação de consumo. É de salientar que, o regime bonificado é para unidades de microprodução com potências de ligação até 3,68 kW e, o regime geral é aplicável a todos os que tenham acesso à atividade. Após o período de 5 anos, e durante um período adicional de 10 anos, é aplicado à instalação de microprodução, anualmente, a tarifa única correspondente à que seja aplicável, no dia 1 de Janeiro desse ano, às novas instalações que sejam equivalentes, ingressando posteriormente no regime geral [44].

A 25 de Outubro de 2010 foi aprovado o Decreto-Lei n.º 118-A/2010, que veio definir uma tarifa única de referência para microprodução, em regime bonificado, de 0,4 €/kWh durante os primeiros 8 anos e de 0,24 €/kWh durante os últimos 7 anos, resultando numa duração total de contrato de 15 anos. É fundamental mencionar que, ambas as tarifas únicas aplicadas nos dois períodos, atrás mencionados, sofrem uma redução anual de 0,02 €/kWh para novas inscrições de FV, sendo também estabelecido um limite para a venda de eletricidade de 2,4 MWh/ano por cada kW instalado. O regime geral continuou inalterado [45].

A 19 de Fevereiro de 2013 foi aprovado o Decreto-Lei n.º 25/2013, que veio definir uma tarifa única de referência, em regime geral, o comercializador de último recurso compra a eletricidade produzida em unidades de microprodução, renumerando-a de acordo com a equação 4 [14].

Assim, a Microprodução é um regime legal que define o processo de venda de energia à rede através de fontes renováveis. Para aderir a este regime é necessário registar-se através de um processo de inscrição no Portal Renováveis na Hora, culminando todo o processo com uma inspeção de conformidade técnica à instalação, antes da sua ligação à rede elétrica [14] [44] [45].

Neste regime, qualquer cidadão ou habitante, como consumidor de energia de baixa tensão pode tornar-se num pequeno produtor de eletricidade de forma simples, vendendo-a à rede pública de distribuição de energia elétrica. Para tal é necessário que o local de consumo associado à microprodução disponha de coletores solares térmicos com um mínimo de 2 m^2 de área útil de coletor ou caldeira a biomassa com produção anual de energia térmica equivalente. A venda da energia elétrica produzida pode ser realizada mediante dois regimes remuneratórios:

- Bonificado – Permite ao microprodutor ter uma potência máxima de ligação à rede elétrica de 3,68 kW (11,04 kW para condomínios com instalações trifásicas), vendendo a energia a um preço superior ao valor pago por kW consumido à rede elétrica pública;

- Geral – Permite ao microprodutor ter uma potência máxima de ligação à rede elétrica de 5,75 kW. Foi definida uma tarifa única de referência, na qual o comercializador de último recurso compra a eletricidade produzida em unidades de microprodução, renumerando-a de acordo com a equação 4 [14].

$$\mathrm{Re}\,m_m = W_m \times P_{ref} \times \frac{IPC_{n-1}}{IPC_{ref}} \quad (4)$$

sendo que, Rem_m é a renumeração do mês m, expressa em €; W_m é a energia produzida no mês m, em kWh; P_{ref} é o valor da parcela de energia da tarifa simples entre 2,3 e 20,7 kVA aplicado no ano de 2012 pelo comercializador de último recurso ao fornecimento da instalação de consumo; IPC_{ref} é o índice de preços no consumidor, sem habitação, referentes ao mês de Dezembro de 2011, publicado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE); e o IPC_{n-1} é o índice de preços no consumidor, sem habitação, referentes ao mês de Dezembro do ano n-1, publicado pelo INE [14].

A nível de contrato de venda de eletricidade e tarifa disponível no regime bonificado, há a opção de contrato com uma duração total de 15 anos, contados desde o 1º dia do mês seguinte ao do início do fornecimento, sendo subdivididos em dois períodos, o primeiro com a duração de 8 anos e o segundo com a duração dos subsequentes 7 anos. Com a renúncia a este contrato ou no final dos 15 anos, o microprodutor é obrigado a ingressar no regime geral [14].

O regime de Miniprodução é a atividade em pequena escala de produção descentralizada de eletricidade. Estas instalações produzem eletricidade a partir de recursos renováveis, tendo por base uma única tecnologia de produção (por exemplo, eólica ou FV) e cuja potência máxima atribuível para ligação à rede é de 250 kW, na condição de que exista um consumo efetivo de metade da eletricidade produzida no local de instalação, estando consagrado através dos decretos-leis 34/2011 e 25/2013 [16] [14].

Neste decreto-lei está definido que toda a energia produzida tem que ser vendida à rede elétrica, não existindo lugar para autoconsumo. Os trâmites do processo de adesão a este regime são em muito semelhantes ao regime de Microprodução. Os critérios de atribuição de licenças são por ordem de chegada para o escalão I e, para os outros escalões, é por leilão de desconto à tarifa bonificada. É importante mencionar que, à semelhança da microprodução, o preço de venda da energia produzida é superior ao preço do valor de compra de eletricidade, sendo que, todos os detentores de um contrato de consumo de energia em baixa tensão possam produzir e vender a totalidade da energia à rede elétrica durante 15 anos em condições especiais. Foi estabelecido um limite para a venda de eletricidade de 2,6 MWh/ano por cada kW instalado.

Neste regime existe a obrigação de consumir na instalação de utilização pelo menos metade da energia produzida, caso contrário pagará coimas até aos 44.000€. Estas coimas vão dos 250€ a 3.740€ (caso seja em nome individual) e dos 500€ aos 44.800€ (para empresas) [14].

Está previsto a introdução de novas taxas ao nível do pedido de registo, reinspecção e averbamento de alterações ao registo da unidade de miniprodução.

Devido ao recente abrandamento verificado nos investimentos nesta área de energias renováveis, à constante subida dos preços de energia e ao óbvio amadurecimento das soluções fotovoltaicas, surgiram novas filosofias de instalação, ganhando mais evidência a filosofia de Autoconsumo. Esta filosofia representa uma parte orgânica da variedade energética do futuro. Esta modalidade de fornecimento não supõe custo para o sistema elétrico já que o consumidor é proprietário de uma instalação solar e produz a sua própria eletricidade.

Este tipo de instalações fotovoltaicas são feitas em locais onde existe rede elétrica pública mas a produção de energia não visa a venda ao abrigo dos regimes conhecidos mas sim o próprio consumo no local.

Há um leque de opções associado já a este tipo de solução, sendo a mais relevante o facto de as soluções de produção e consumo local permitirem a capacidade ou não de armazenar em pequenas baterias de acumulação os excessos de produção diurna para aproveitamento noturno. A rede elétrica pública serve como complemento sempre que seja necessário energia extra para suprimir as necessidades de consumo, ou seja, para colmatar o défice que possa existir entre a produção e consumo no local. Desta forma pode conseguir-se uma redução muito significativa na fatura de energia, sendo esta maior quanto mais alargada for a capacidade de aproveitamento das horas de produção solar.

Normalmente os sistemas fotovoltaicos para autoconsumo são dimensionados para a modalidade instantânea e otimização, de forma a evitar a injeção da energia produzida excedente na rede, cobrindo então os consumos energéticos constantes.

As vantagens da modalidade de autoconsumo fotovoltaico são inúmeras, sendo as principais o custo reduzido deste tipo de instalações, estando continuamente a baixar, a independência do crescimento do preço da luz e, mais importante, a melhoria da competitividades das empresas/entidades que podem reduzir a fatura de eletricidade nos seus custos operacionais.

A nível regional há alguns exemplos de sucesso e aplicação desta filosofia, como por exemplo, a empresa FactorENERGIA que realizou no Hotel Galo Resort a primeira instalação fotovoltaica em regime de autoconsumo na RAM e uma das primeiras do país. Esta modalidade é bastante vantajosa e está provada ser economicamente viável, tendo em consideração que a instalação fotovoltaica produzirá eletricidade durante pelo menos 20 anos, com um custo muito inferior ao preço da eletricidade comprada à rede pública [46].

Com base nas interpretações realizadas aos decretos-leis sobre os valores médios pagos por cada kWh produzido em regime de microprodução e num estudo realizado acerca dos valores cobrados pela EEM por cada kWh c/IVA consumido, em regime de Baixa Tensão Normal (BTN) até 20,7kVA, com tarifa Bi-horária, sendo este, o regime contratual mais comum entre os clientes da RAM, realizou-se o gráfico da figura 51.
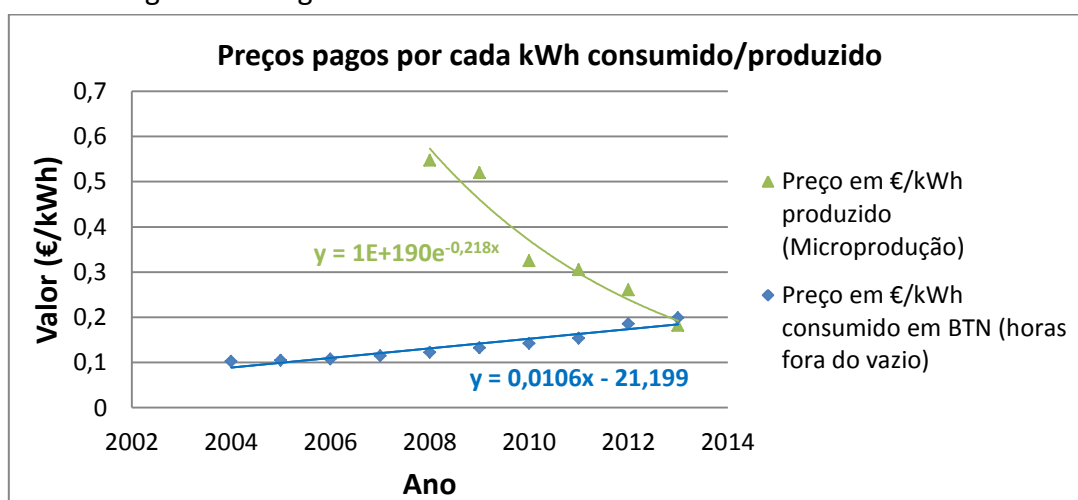
Figura 51 - Preços pagos por cada kWh produzido em microprodução e preços pagos por cada kWh consumido da rede pública.

Da interpretação do gráfico da figura 51 pode-se afirmar que, a partir de 2009 até à presente data, os valores médios pagos por kWh produzido para a microprodução diminuíram consideravelmente, passando de 0,547 €/kWh para 0,182 €/kWh (em 2013), mantendo uma

tendência decrescente (y = 1E+190e$^{-0,218x}$), apoiada pelo contexto económico atual. Em 2013, o valor pago por cada kWh consumido foi ultrapassado pelo valor recebido por cada kWh produzido em regime de microprodução e com tendência para continuar a aumentar (y = 0,0106x-21,199), compensando assim consumir a energia produzida, reduzindo o consumo energético proveniente da rede pública.

Da interpretação do gráfico da figura 51 pode-se afirmar que, a partir de 2009 até à presente data, os valores pagos por kWh produzido para a microprodução diminuíram consideravelmente, passando de 0,547 €/kWh para 0,182 €/kWh (em 2013), mantendo uma tendência decrescente (y = 1E+190e$^{-0,218x}$), apoiada pelo contexto económico atual. Em 2013, o valor pago por cada kWh consumido ultrapassou o valor recebido por cada kWh produzido em regime de microprodução e com tendência para continuar a aumentar (y = 0,0106x-21,199), compensando assim consumir a energia produzida, reduzindo o consumo energético proveniente da rede pública.

É importante referir que, o regime remuneratório para os FV foi inicialmente definido em 1 de Julho de 2002 (0,20 €/kWh), através da Portaria n.º 764/2002 [47]. Logo, desde o ano 2002 até finais de 2008, os valores pagos por kWh produzido para a microprodução subiram, de 0,20 €/kWh para 0,547 €/kWh.

O gráfico da figura 52 representa o valor recebido por cada kWh produzido em regime de miniprodução (y = -0,0035x + 7,1442), o valor pago por cada kWh consumido nas horas de ponta e cheias, em regime de Baixa Tensão Especial (BTE), com tarifa tetra-horária, sendo este, o regime contratual mais comum entre os edifícios públicos (escolas).
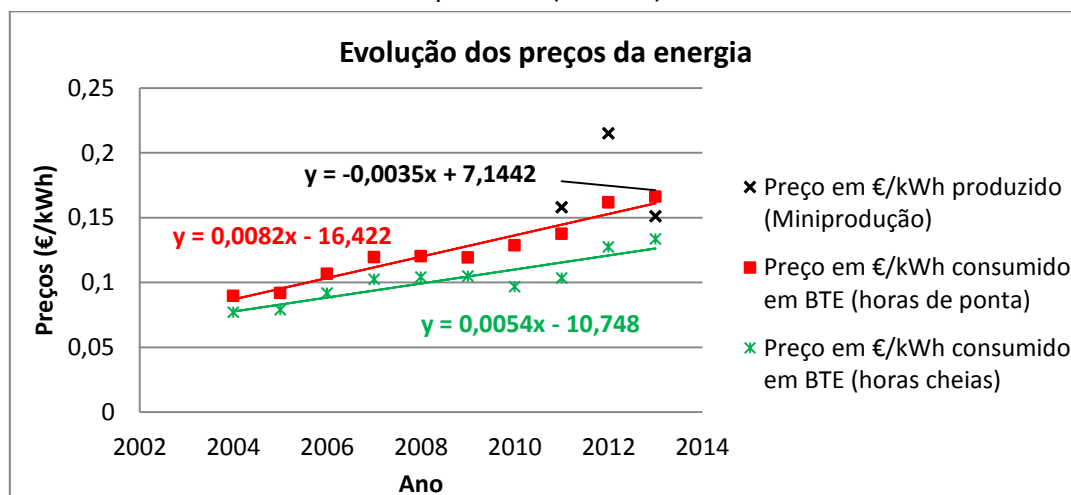
Figura 52 - Preços pagos por cada kWh produzido em miniprodução e preços pagos por cada kWh consumido da rede pública.

Analisando o gráfico da figura 52 verifica-se que as funções do preço pago por cada kWh produzido em regime de miniprodução e por cada kWh consumido nas horas de ponta (y = 0,0082x-16,422) intersectaram-se no ano 2012, ou seja, a partir deste período compensa consumir a energia produzida pelos FV em regime de autoconsumo em vez de a vender, uma vez que, o valor recebido por cada kWh produzido é inferior ao preço pago por cada kWh consumido da rede pública.

Mantendo a tendência atual de aumento do preço pago por cada kWh consumido nas horas cheias e a estabilização do valor recebido por cada kWh produzido, observa-se através do gráfico da figura 52 e das funções do preço pago por cada kWh produzido e da função do preço pago por cada kWh consumido nas horas cheias (y = 0,0054x-10,748) que, em finais de 2018, o valor pago por cada kWh consumido ultrapassará o valor recebido por cada kWh produzido.

Os valores dos preços pagos por cada kWh consumido da rede pública (em BTN e BTE), presentes nos gráficos das figuras 51 e 52, aumentaram sempre anualmente, sendo as variações verificadas nestes valores também justificadas pelo valor de IVA praticado na altura.

É importante referir que, os valores pagos por cada kWh consumido da rede pública em Portugal são 13,6% superiores ao preço médio da UE e, com perspetivas de um novo aumento de 2,8%, proposto pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), a introduzir em 1 de Janeiro de 2014 [48] [49].

4.4 Análise do retorno do investimento (microprodução) e previsões futuras

O gráfico da figura 53 apresenta os anos necessários para obter o retorno do investimento de uma instalação de microprodução em diferentes regimes, consoante o ano do investimento realizado, instalada na zona do Funchal. Este gráfico resultou da simulação no RETScreen de um FV com uma potência de 3,68 kW, com uma produção anual de aproximadamente 5272,85 kWh e com os valores pagos por kWh produzido praticados em cada ano.
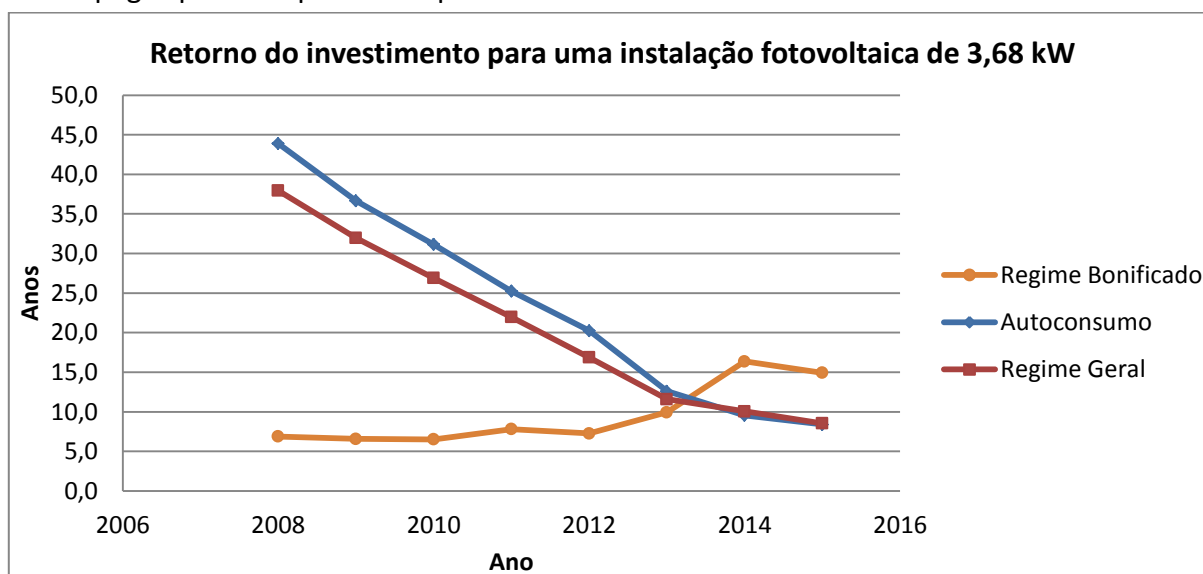
Figura 53 - Retorno do investimento de uma instalação de microprodução com 3,68 kW de potência instalada.

Da análise do gráfico da figura 53 verifica-se que, para o regime bonificado o retorno do investimento mais baixo ocorreu no período de 2008 a 2012, situando-se à volta dos 6,5 a 7,5 anos. Em 2013, quando ocorreu uma alteração no regime remuneratório, descrita pelo decreto-lei n.º 118-A/2010, houve um aumento do tempo de retorno para aproximadamente 10 anos (9,9 anos). O grande aumento verificado foi provocado pela diminuição do valor pago por cada kWh produzido por FV e responsável por uma forte quebra nos investimentos na área da energia fotovoltaica desde então. O aumento apenas foi atenuado graças ao custo das instalação fotovoltaicas ter mantido a tendência decrescente, conforme verificado no gráfico da figura 50.

A partir de 2013 até ao presente, o retorno do investimento em regime bonificado tem aumentado consideravelmente para valores considerados pouco apelativos para investimento (> 10 anos). Já o regime geral e autoconsumo apresentam-se cada vez mais apelativos e com perspetivas de melhores retornos dos investimentos (< 10 anos).

Através de dados gentilmente disponibilizados pela EEM sobre todos os sistemas fotovoltaicos instalados na RAM verificou-se que a potência total instalada na maior parte das instalações fotovoltaicas ultrapassava largamente o limite legal (3,68 kW). Assim, a partir destes dados foi realizada uma média dos valores de potências instaladas de 10 instalações de microprodução (Anexo 4), retornando o valor médio de 4,05 kW. Este valor de potência é então

atenuado para 3,68 kW através dos inversores, presentes nos sistemas fotovoltaicos e acreditados/permitidos por lei.

Com estas novas informações foi criado o novo gráfico da figura 54, representando o número de anos necessários para haver o retorno do investimento de uma instalação de microprodução de 4,05 kW de potência instalada, localizada no Funchal, consoante o ano do investimento realizado e com uma produção média anual de aproximadamente 5800 kWh, assim como uma projeção do retorno para 2015.
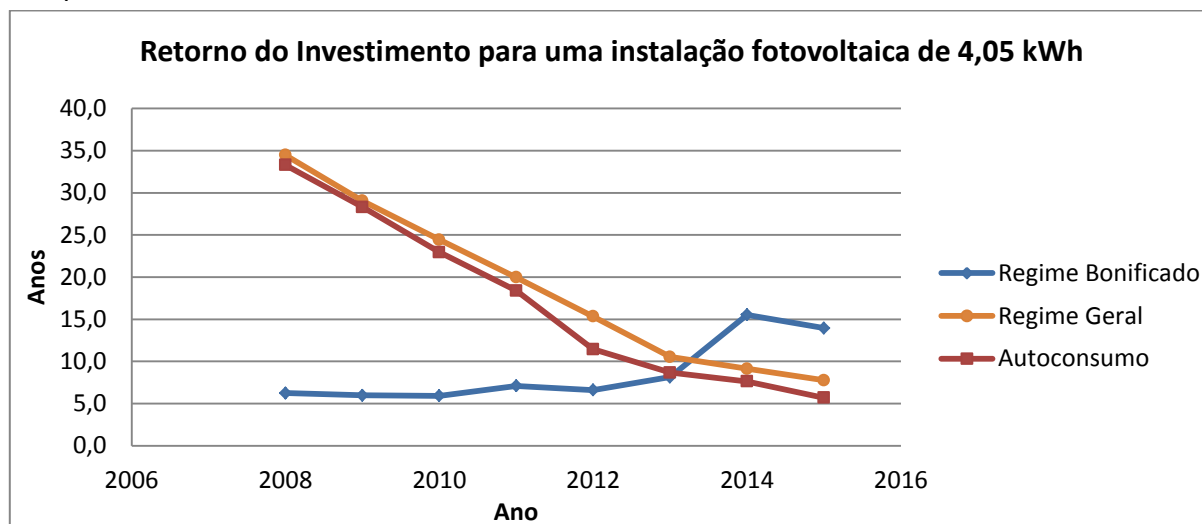
Figura 54 - Retorno do investimento de uma instalação de microprodução com 4,05 kW de potência instalada.

Da análise do gráfico da figura 54 verifica-se que o retorno do investimento em Regime Bonificado mais baixo, ocorreu no período de 2008 a 2010, situando-se à volta dos 6 anos. Entre 2010 e 2012, quando ocorreu uma alteração no regime remuneratório, fruto do decreto-lei n.º 118-A/2010, houve um aumento do tempo de retorno e posteriormente um decréscimo devido ao facto do custo das instalação fotovoltaicas ter mantido a tendência decrescente.

A partir de 2012 o tempo de retorno tem aumentado continuamente até ao presente dia, situando-se em valores impróprios para o investimento (> 15 anos) na microprodução em regime bonificado. É de referir que, este aumento provocado pela diminuição do valor pago por cada kWh produzido, foi responsável por uma forte quebra nos investimentos na área da energia fotovoltaica desde então.

Ainda examinando o gráfico da figura 54 se verifica que atualmente será mais vantajoso aderir ao Autoconsumo do que ao Regime Geral ou Bonificado, uma vez que, este é o que apresenta valores mais inferiores para o tempo de retorno. Este gráfico mostra também que, só agora em 2014, o Regime Geral apresenta melhor retorno do investimento do que o Regime Bonificado. É de notar que, o Autoconsumo sempre teve melhor retorno do investimento que o Regime Geral, ao longo do tempo.

Prevê-se que a tendência futura relativamente ao tempo de retorno para o Regime Bonificado seja lentamente decrescente, favorecendo assim o Regime Geral e Autoconsumo mas sendo esta última opção a mais vantajosa, sempre.

Verifica-se que os tempos de retorno de investimento em 2014, entre os Regimes Geral (9,1 anos) e Bonificado (15,5 anos), são muito distantes. Para o Autoconsumo (7,6 anos) estes valores baixam para valores inferiores a 8 anos. A diferença entre o retorno do investimento do Regime Geral e o Bonificado para o ano 2014 é de aproximadamente 6 anos e 5 meses e, a diferença entre o Regime Geral e o Autoconsumo é de aproximadamente 1 ano e 6 meses.

Em 2015, os tempos retorno do investimento para as várias modalidades são, por ordem crescente: Autoconsumo (5,7 anos), Regime Geral (7,8 anos) e Regime Bonificado (14 anos).

Esta conclusão relativamente ao Regime Geral só se aplica às instalações de microprodução, uma vez que, para instalações de miniprodução é aplicada uma fórmula distinta ao Regime Geral. Além disso, o preço pago por kWh produzido foi mantido inalterado desde o ano 2014.

O gráfico da figura 55 foi construído a partir dos resultados obtidos e da tendência verificada, no qual se visualizam as previsões do comportamento do número de anos do retorno do investimento, do valor pago por cada kWh consumido e do preço das instalações fotovoltaicas para microprodução (4,05 kW), considerando o IVA, até o ano 2016.

O custo da energia por kWh consumido nas horas fora do vazio, no regime BTN, foi previsto considerando para cada ano um acréscimo percentual igual à média dos acréscimos percentuais dos últimos 10 anos (≈ 7,04 %). É importante mencionar que, a média anual da variação do custo de energia em regime BTE, nos últimos 10 anos, ronda os 5,77%.
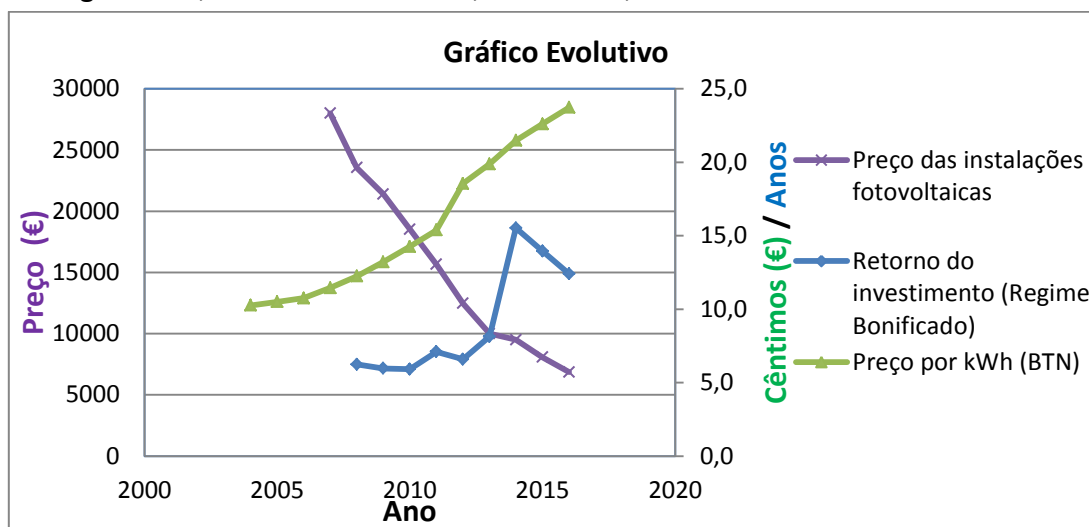
Figura 55 - Previsões acerca dos preços das instalações, valor pago por kWh consumido e retorno do investimento.

Da análise do gráfico da figura 55 verifica-se que o custo por cada kWh consumido em regime BTN, fora da hora de vazio tem aumentado anualmente desde 2006, rondando os 21,48 cêntimos atualmente (2014) mas, seguindo a tendência atual, este valor aumentará para 24,61 cêntimos em 2016. Assim, de acordo com estas previsões, a partir de 2016 será possível investir em instalações fotovoltaicas para autoconsumo sem qualquer incentivo fiscal e com retorno de investimento muito rápido. Em 2016 o custo e retorno das instalações FV para microprodução (4,05 kW) rondarão os 6.864€ e os 12,5 anos, respetivamente.

Os dados selecionados para esta previsão e estudo da energia foram os valores dos kWh fora da hora do vazio porque, regra geral, o maior consumo dos edifícios públicos e domésticos ocorre durante este período e os FV só produzem energia durante esta altura.

É importante referir que, o retorno das instalações de microprodução em regime bonificado, patentes nas figuras 53, 54 e 55, só decresceu após 2014 porque o preço pago por kWh produzido foi fixo (para os valores de 2014) e o custo dos FV continuou a diminuir.

4.5 Conclusões

Analisando as previsões realizadas aos preços dos FV para microprodução, patente na figura 50, verifica-se que dentro de 3 a 5 anos, os preços rondarão os 5.000 €, se a tendência de diminuição nos preços dos FV verificada desde há 7 anos, se mantiver. Sabendo que, os PV são os componentes mais caros dos FV e que o preço das instalações fotovoltaicas para microprodução está a diminuir

constantemente, pode-se generalizar que o preço das instalações fotovoltaicas de qualquer dimensão/potência de saída também está a diminuir, uma vez que, estas usam muitos dos componentes presentes nas unidades de microprodução.

Da análise do mercado disponível na área de FV e energia comprovou-se que, ao longo destes últimos 5 anos, os custos das instalações fotovoltaicas caíram 48,7% e, o preço pago à EEM por cada kWh consumido numa instalação elétrica subiu 185% e 187% nas horas cheias e de ponta em regime BTE, respetivamente, e 209,3% nas horas fora de vazio em regime BTN, nos últimos 10 anos. Apesar do aumento do preço pago por kWh consumido e dos preços das instalações fotovoltaicas terem reduzido para mais de metade do valor, o preço pago por kWh consumido ainda não alcançou o valor pago por cada kWh produzido em regime BTE, exceto no caso das horas de ponta (figura 52), mas estando para breve se continuar a tendência atual.

O facto de terem sido instalados potências superiores ao permitido pela lei só foi possível porque, no momento da inspeção, o único elemento do sistema fotovoltaico a ser inspecionado mais cuidadosamente e rigorosamente era o inversor, uma vez que este limita a potência máxima a ser debitada pelo FV para a rede de distribuição pública. Daí resulta que, no início de produção do sistema, a energia produzida seja maior do que um sistema com 3,68 kW de potência logo atinja mais rapidamente a sua produção máxima e, ao final do dia quando a radiação solar disponível começa a diminuir, os níveis de produção de energia continuam a ser superiores.

Analisando os retornos das instalações fotovoltaicas de 3,68 e 4,05 kW, representados nas figuras 53 e 54, constata-se que deveria ter ocorrido um aumento no tempo de retorno mais acentuado no início do ano 2009 mas como foram instalados valores superiores ao permitido por lei para a máxima potência instalada em regime de microprodução, o tempo de retorno foi atenuado para que este regime continuasse a ser apelativo aos investidores. Ainda analisando estas figuras, é visível que o tempo de retorno do investimento para uma instalação com uma potência instalada de 4,05 kW é mais rápido e inferior ao tempo de retorno de uma instalação fotovoltaica de 3,68 kW. Prova disso, é o retorno verificado em ambos os gráficos para o ano 2013, nos quais se observa um retorno de 8,1 anos para um FV de 4,05 kW e de 9,9 anos para um FV de 3,68 kW, em Regime Bonificado.

Finalmente, como resultado das recentes mudanças nas tarifas únicas de referência para microprodução, ao nível dos regimes bonificado e geral, este último se tornou mais atrativo somente agora, com tempos de retorno inferiores ao regime bonificado (figura 54). Prova disso, são os muitos pedidos/inscrição de novos FV em regime geral no site oficial “Renováveis na hora” e, raros os pedidos para regime bonificado desde meados de Outubro de 2013.

Capítulo 5 - Casos de estudo

5.1 Introdução

No presente capítulo analisam-se cinco casos de estudo, criados especificamente para projetar os custos, retorno e emissões de CO_2 evitadas, com a instalação de FV e sistemas solares térmicos nos edifícios públicos. Estes estudos foram desenvolvidos e baseados nos resultados das simulações, efetuadas em diferentes programas, e nos dados das informações energéticas de cada caso específico.

Os casos de estudo 1,2,3 e 4 são relativos à área da energia fotovoltaica, nos quais, a partir das análises e pesquisas realizadas anteriormente, concluiu-se que, o tipo de instalação fotovoltaica que melhor se adequa aos edifícios públicos selecionados é o sistema de autoconsumo. Ou seja, são instalações fotovoltaicas para autoconsumo ligadas à rede pública, de forma a suprimir as restantes necessidades energéticas do edifício público [50]. Esta decisão teve como principais argumentos o facto do valor pago por cada kWh produzido ter descido, o preço pago por cada kWh consumido ter aumentado e com previsões de continuar a subir. No Anexo 5 (Secção 5.1) apresenta-se o esquema de ligação do sistema de autoconsumo dimensionado.

Para as escolas e edifícios com serviços públicos considerou-se duas instalações de autoconsumo predefinidas, com 20 kW e 10 kW de potência de saída, respetivamente. Para tal, os modelos dos PV são iguais e as estruturas de suporte dos PV são universais a todos os casos de estudo desenvolvidos. Assim, agrupou-se um conjunto de edifícios a cada uma das instalações tipo, não se adaptando os FV a cada situação/prédio específico, reduzindo desta forma os custos dos projetos e equipamentos. As áreas dimensionadas para estes FV foram de 153 m^2 e 77 m^2 para os sistemas de 20 kW e 10 kW, respetivamente. Logo, de toda a área para instalação disponível nos diversos prédios públicos, só é necessário estas áreas para a colocação dos sistemas de autoconsumo dimensionados.

Para levar a cabo a análise destes casos de estudo, foi realizado um estudo prévio do funcionamento dos sistemas de autoconsumo, de forma a utilizar-se corretamente os programas de simulação e, prioritariamente, equilibrar a relação entre o consumo e a produção de energia fotovoltaica.

Como os casos em estudo implicam a intenção de fornecimento de eletricidade fotovoltaica ao longo de todo o ano, durante a vida útil do painel fotovoltaico, o planeamento dos FV s/baterias tornou-se mais complicado porque foi necessário ter o cuidado de comparar a energia produzida pelo FV com a energia consumida na instalação elétrica do prédio público, uma vez que, o consumo de energia e a quantidade de radiação disponível durante o Verão e o Inverno varia significativamente. Nestes sistemas de autoconsumo não pode haver excessos de produção de energia para não ocorrer desperdícios de energia elétrica, sendo então considerado este facto no dimensionamento dos FV.

No caso de estudo 5 foram dimensionadas soluções solares térmicas para aquecimento de águas de piscinas, no qual se identificaram os pavilhões das piscinas contidos no ambiente dos prédios escolares identificados e, depois, de todos os pavilhões de piscinas públicas da RAM. De seguida, realizou-se um estudo da sua utilização, consumos e tamanho, dimensionando-se a melhor solução para cada caso específico, posteriormente.

Finalmente foi realizada uma interpretação dos resultados obtidos, em relação às emissões de CO_2 evitadas, aos custos das instalações e quanto ao retorno de um possível investimento nas diversas tecnologias implementadas.

5.2 Caso de estudo 1 – Edifícios públicos escolares

Neste caso de estudo analisa-se o impacto que um FV tem, de forma a poder contribuir para a eficiência energética de um prédio público, através dos valores obtidos pelo programa de simulação RETScreen.

Nesta situação, utilizou-se como exemplo universal, um prédio escolar que leciona o Ensino Secundário Diurno, com um total de 450 alunos diurnos e o Ensino Secundário Recorrente, com aproximadamente 50 alunos, perfazendo um total de pessoal de 600, discentes e não discentes. O prédio conta com 35 salas de aulas e possui índices de exposição solar considerados bons.

Executaram-se então simulações no programa RETScreen com seguintes parâmetros: características dos painéis fotovoltaicos, fração solar, perfis de consumo a uma carga constante, localização, inclinação e orientação dos módulos solares, entre outros. Assim, o procedimento efetuado para simular o FV de 20 kW de potência instalada foi:

- Executar o aplicativo RETScreen 4;
- No separador "Iniciar" colocaram-se os seguintes dados de entrada na caixa "Informação sobre o projeto":
  - Tipo de projeto: Produção de eletricidade;
  - Tecnologia: Fotovoltaica;
  - Tipo de *grid*: Rede Central;
  - Tipo de análise: Método 2;
  - Poder calorífico de referência: Poder calorífico superior;
  - Moeda: Euro;
  - Unidades: Unidades métricas.

O tipo de *grid* escolhido é "Rede Central" porque o FV dimensionado estará em contacto com a rede pública de distribuição elétrica e o tipo de análise eleito ("Método 2") é o método que permite realizar as diferentes análises do FV dimensionado (Análise de custos, Emissões, Risco, etc.).

- Na caixa "Condições de Referência do *site*" foi selecionado o local dos dados climáticos a utilizar no processo de simulação. No menu "Localização dos dados climáticos" foi escolhida a opção "Funchal/Madeira *Island*" e foi ativada a opção "Mostrar dados", de forma a visualizar os dados mensais sobre o local eleito, como por exemplo, temperatura do ar, humidade relativa, radiação solar diária – horizontal, velocidade do vento, temperatura do solo, etc.

Para proceder à configuração do sistema fotovoltaico a simular, abriu-se o separador "Modelo Energético", selecionando as seguintes opções conforme requisitado:

- Na caixa "Sistema de Eletricidade do caso proposto", na parte da "Avaliação de recursos" foi ativada a opção "Mostrar dados" e escolheram-se as seguintes preferências:
  - Sistema de posicionamento solar: Fixo;
  - Inclinação: 27°;
  - Azimute: Sul;
  - Preço eletricidade exportada (€/MWh): 144,39 (Valor médio calculado na Secção 5.2.3 para o preço pago por cada MWh consumido em regime BTE).

Seguindo as indicações mencionadas no Capítulo 2, Secção 2.5.1.9, o ângulo de inclinação escolhido foi o que apresentava os melhores valores de energia anual produzida para a orientação/azimute Sul, entre os ângulos recomendados (25 a 30º). O sistema de posicionamento solar é fixo porque o FV dimensionado não possui o Sistema de Seguimento Solar, ou seja, os seus PV estão sempre na mesma posição independentemente da posição do Sol.

- Na parte “Fotovoltaica” foram efetuadas as seguintes escolhas, consoante as características do PV utilizado no dimensionamento dos FV (Anexo 5):
    - Tipo: poly-Si (PV policristalino);
    - Potência elétrica (kW): 20 kW (Potência instalada no FV);
    - Fabricante: Bosch;
    - Modelo: M240 (84 unidades);
    - Eficiência (%): 14,6;
    - Temperatura de operação normal da célula (°C): 45;
    - Coeficiente de temperatura (%/°C): 0,40;
    - Área do coletor solar (m^2): 1,64;
    - Perdas diversas (%): 1.

São necessárias 84 unidades do PV eleito (Bosch M240) para o FV dimensionado possuir 20 kW de potência instalada, tendo sido calculado este número através do seguinte raciocínio: Potência instalada = Potência do PV * Unidades = 240 W*84 = 20.160 W ≈ 20 kW. A eficiência é fornecida no *datasheet* do PV (14,6 %), sendo este valor confirmado através da equação 1.

- Na parte “Inversor” foram atribuídas as seguintes características, de acordo com as características do inversor eleito no dimensionamento dos FV (Anexo 5):
    - Eficiência (%): 98,1;
    - Perdas diversas (%): 1.

Os campos referentes a “Perdas diversas”, nas partes “Fotovoltaica” e “Inversor”, dizem respeito a alguns fenómenos de perdas de energia (perdas térmicas ou perdas em linha) que ocorrem durante o processo de conversão de energia solar em elétrica, como por exemplo, perdas térmicas devido a aquecimento do módulo fotovoltaico (diferença entre a temperatura ambiente e módulo solar).

- Foram guardadas as informações presentes na parte “Resumo”, sobre o fator de utilização e eletricidade exportada para a rede através do FV dimensionado.

No separador “Análise de Custos”, na caixa “Opções”, foram marcadas “Método 2” e “Notas/faixa”. Foi selecionado o “Método 2” de forma a habilitar uma maior personalização dos critérios de custos do FV dimensionado. Na parte “Sistema de produção de eletricidade” foram inseridos os valores da potência instalada no FV (no menu “Fotovoltaica (kW)”) e o custo unitário de cada FV (no menu “Definido pelo usuário (€)”).

De seguida foi aberto o separador “Análise de Emissões” e ativada a caixa de “Análise de Emissões”, selecionando posteriormente o “Método 1”. O “Método 1” foi o eleito porque este automaticamente seleciona o fator de emissão de GEE (TCO_2/MWh), emissão de GEE (TCO_2) e consumo de combustível, consoante o país/região de instalação do FV dimensionado. Na caixa “Sistema elétrico de referência (*Baseline*)” selecionou-se as seguintes opções:

- País - região: Portugal;
- Tipo de combustível: Todos os tipos;

Posteriormente foram gravados os resultados presentes na caixa “Sumário da redução de emissões dos GEE”, como a redução anual bruta e líquida de emissões de GEE (TCO_2), assim como as suas equivalências (hectares de floresta absorvendo carbono, litros de *diesel* não consumidos, etc.).

No separador “Análise Financeira”, foram inseridos na caixa “Parâmetros financeiros” os seguintes dados nas partes “Geral” e “Financiamento”, respetivamente:

- Vida do projeto (anos): 15;

- Incentivos e subsídios (€): -43.950 (Orçamento selecionado na Secção 5.2.3 para o FV dimensionado).

Apesar da vida útil de um FV ser igual ou superior a 20 anos em média, foram selecionados os 15 primeiros anos da vida do projeto para análise, por ter sido considerado suficiente para provar a viabilidade do projeto dimensionado.

No separador "Análise de Risco", foi selecionada a opção "Análise de Risco" e, no menu referente à "Análise de performance" foi escolhida a alternativa "TIR após impostos - capital". Na caixa "Parâmetro" foi definido 5,77% como a percentagem do valor da "Faixa (+/-)", tendo sido calculado na Secção 4.4. O campo "Faixa (+/-)" representa as variações anuais que os valores do preço de energia consumida (144,39 €/MWh) podem oscilar.

De seguida foi executado o botão "Clique aqui para calcular análise de risco" e foram gravados os resultados da percentagem média do risco de investimento, mínimo e máximo do intervalo de confiança, assim como o gráfico da distribuição (TIR após impostos - capital).

Posteriormente foi gravado o ficheiro geral da simulação do sistema fotovoltaico dimensionado para as escolas públicas da RAM, de forma a facilitar futuras consultas. Para tal, abriu-se o separador "Ficheiro", presente na barra superior do programa RETScreen, clicou-se em "Guardar".

Finalmente foram repetidos os passos anteriores, para a simulação do FV com uma potência instalada de 10 kW (Caso de estudo 2), efetuando as respetivas alterações às variáveis de entrada.

Como exceção, a EBSC está incluída na mesma análise deste caso de estudo, no qual se utilizou o programa RETScreen com os dados da radiação solar do Funchal para realizar as simulações, obtendo os resultados mencionados posteriormente, por defeito. Esta inclusão na mesma análise dos casos dos edifícios escolares da zona do Funchal é perfeitamente aceitável e os resultados são por defeito porque pelo mapa de radiação solar anual (figura 7), a zona da Calheta possui melhores índices de radiação solar em relação ao Funchal.

5.2.1 Caracterização dos imóveis escolares

Trata-se de edifícios localizados no Arquipélago da Madeira, nas áreas do concelho da Calheta e da cidade do Funchal, apresentando valores de radiação solar global diária média anual de aproximadamente 4,4 kWh/m^2.dia, conforme demonstrado nos mapas de radiação da RAM (figura 7 e Anexos 1 e 2).

Utilizou-se o programa RETScreen para a obtenção de valores como a radiação solar local, a produtividade, a energia solar (E_{solar}), as emissões evitadas, os custos e analisar o risco do investimento da instalação fotovoltaica dimensionada, para a situação universal atrás descrita.

Os dados da figura 56 advêm de um coletor da marca Bosch Modelo M240-3BB (240W), certificado e selecionado especificamente entre os existentes à venda no mercado. Os dados desta figura são referentes à radiação solar horizontal e inclinada para o concelho do Funchal, onde se encontram os edifícios identificados anteriormente (Capítulo 3, Secção 3.2), assim como os possíveis locais de instalação de PV.
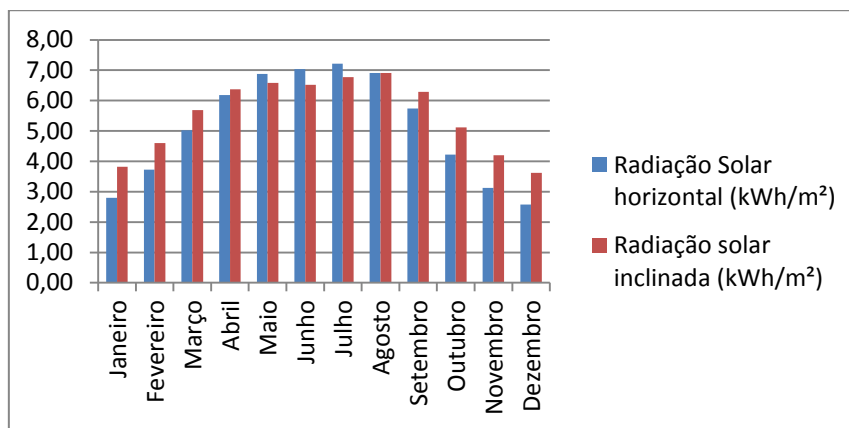
Figura 56 - Radiação solar horizontal e inclinada para o concelho do Funchal.

Pelo gráfico da figura 56 verifica-se que a radiação solar média diária horizontal e inclinada é de 5,13 e 5,54 kWh/m^2.dia, respetivamente. A inclinação ótima dos PV, para máxima rentabilização dos FV, ocorre no ângulo de 27° com a superfície plana (0°).

5.2.2 Perfil de consumo dos edifícios escolares

De acordo com o tipo de utilização e consumo a contribuição do sistema varia, sendo por isso um ponto fundamental para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, de forma a garantir um equilíbrio entre a energia produzida pelos FV e as necessidades de consumo, uma vez que, nos sistemas de autoconsumo s/baterias nunca pode haver excedentes de produção de energia.

Este facto é uma das maiores incertezas por parte do projetista, logo exige um maior cuidado e estudo acerca do consumo geral do edifício em causa. Para tal, analisou-se os consumos de eletricidade dos prédios escolares localizados em diversos pontos da RAM.

Antes de se realizar essa análise é importante definir alguns parâmetros presentes nas faturas de eletricidade, designadamente o que se entende por Horas de Ponta, Horas Cheias e Horas de Vazio. É de notar que, o período horário de vazio aplicável nas tarifas com dois ou três períodos horários, engloba os períodos de vazio normal e de super vazio.

Estas horas dizem respeito a períodos de tempo que variam consoante a estação (Inverno ou Verão), sendo que, na figura 57 está uma explicação gráfica destas horas para a RAM. Cada um destes períodos tem diferentes valores de faturação por cada kWh consumido, sendo que, o período mais caro diz respeito às Horas de Ponta (0,166 €/kWh), seguido das Horas Cheias (0,1336 €/kWh), Horas de Vazio (0,0852 €/kWh) e, finalmente, as Horas de Super Vazio (0,0794 €/kWh). Como não se assinala na figura 57 as Horas de Super Vazio, regista-se que as mesmas ocorrem entre o período compreendido da 01h30 às 05h30.
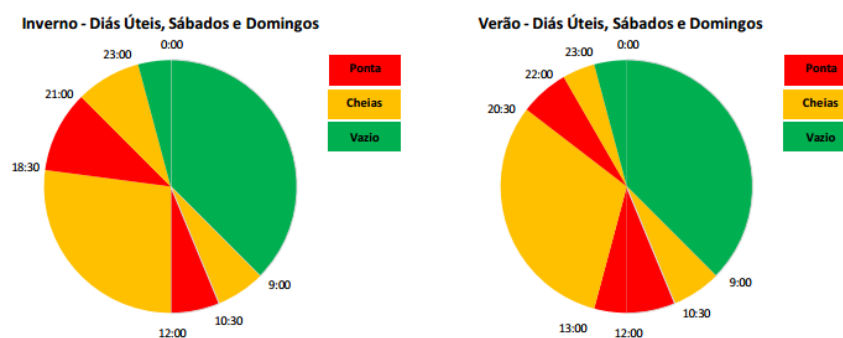
Figura 57 - Períodos das horas de faturação [51].

Através da análise das faturas de eletricidade de duas escolas da RAM secundárias, foi realizado o gráfico da figura 58, que mostra os consumos médios mensais das escolas da RAM, em kWh.
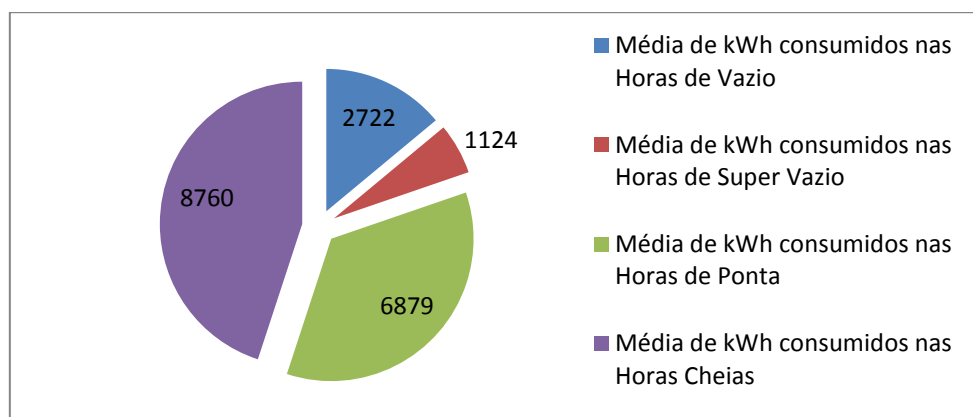
Figura 58 - Consumos médios energéticos das escolas da RAM

A partir dos dados presentes no gráfico da figura 58, comprova-se uma despesa média mensal de aproximadamente 2.633,41€, sendo que, os períodos de maior consumo deram-se nas designadas Horas Cheias e nas Horas de Ponta, ou seja, ocorreram nos períodos mais caros de faturação. Observando então o gráfico da figura 57, verifica-se que os períodos de Horas Cheias e Horas de Ponta são períodos consecutivos, ocorrendo entre as 9h e as 23h.

Baseando-se nestes factos verifica-se que a maior produção de energia fotovoltaica ocorre durante os períodos de maior consumo energético atrás mencionados, logo a escolha que melhor satisfaz as necessidades energéticas dos prédios escolares é, a solução de autoconsumo s/baterias.

Do gráfico da figura 58 observa-se um consumo mensal total, nas horas cheias e de ponta, na ordem dos 15.639 kWh, ou seja, um consumo diário num período de 14h (9h-23h) de aproximadamente 521,3 kWh. Assim, a potência máxima de saída para a instalação de autoconsumo que melhor se adequa a este consumo diário seria de 20 kW, uma vez que, a instalação fotovoltaica produz eletricidade durante uma média de 10h/dia (9h-19h), sendo esta capaz de produzir o valor máximo teórico de 200 kWh/dia, representando este valor 38,4% da energia média diária consumida nas horas cheias e de ponta.

Como o valor do consumo médio diário não discrimina os fins de semana (sábado e domingo), nos quais os consumos são inferiores à média diária, foi escolhido o valor de 20 kW de forma a minimizar o excesso de produção de energia que ocorra durante estes dias.

5.2.3 Solução fotovoltaica dimensionada para os edifícios escolares

Após a análise das faturas de eletricidade dos prédios escolares e, sabendo que, os mesmos possuem contratos de potência com a EEM superiores a 41,4 kW Tetra-horária, em tarifa de Baixa Tensão Especial (BTE) e uma potência contratada de 136 kVA (se o fator de potência for 1, é igual a 136 kW), concluiu-se que a melhor solução seria a produção de eletricidade por fotovoltaico sem injeção na rede pública e sem armazenamento (baterias), ou seja, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para autoconsumo com uma potência máxima de 20 kW.

A energia produzida durante o dia é consumida pela própria instalação, reduzindo assim, o consumo de energia elétrica da rede pública, assim como os custos energéticos. Resumidamente, as instalações elétricas presentes nos prédios escolares têm uma potência contratada de 136 kW, pelo que 20 kW são certamente constantes ou debitados, por parte do sistema de autoconsumo (sem baterias/acumulação).

Para a realização deste sistema de autoconsumo fotovoltaico, idealizou-se uma área com aproximadamente 153 m^2. É importante referir que, para esta solução se obtiveram três orçamentos diferentes de três empresas, o primeiro orçamento tinha um custo total de 30.900 €, sendo este o preço praticado por uma empresa sediada em Portugal Continental, ou seja, existiriam mais

encargos devido à logística envolvida num processo deste tipo para uma instalação na RAM; o segundo e terceiro orçamento foram de 43.950 € e 57.279 €, dos quais ambas as empresas estão sediadas na RAM. Assim, o valor de referência utilizado nos cálculos que se seguem é de 43.950 € e foi selecionado segundo vários critérios, como por exemplo, o preço/qualidade dos equipamentos do FV, ranking mundial dos PV, eficiência dos inversores, entre outros.

A área necessária para a instalação deste sistema solar (153 m^2), está disponível em qualquer um dos prédios públicos escolares identificados no Capítulo 3 (Secção 3.2), à exceção da Escola Cristóvão Colombo, na qual, optou-se pela instalação fotovoltaica de apenas 10 kW de potência máxima, uma vez que, apenas se possui uma área de instalação livre de 79 m^2. O custo do sistema poderia ser mais baixo mas utilizaram-se bons componentes, como os módulos solares da Bosch (monocristalinos) com uma eficiência de 14,6%, oferecendo garantias de saída de potência de 25 anos, do produto de 10 anos e produção de energia de 90% durante os primeiros 10 anos e, 80% durante 25 anos. Outro exemplo, foi o inversor selecionado que possui um excelente rendimento de 98%.

Na tabela 10, apresentam-se alguns dados como, por exemplo, a radiação solar, eletricidade produzida e valores c/IVA, obtidos através da interpretação dos valores da simulação do sistema solar autónomo de 20 kW, realizada no programa RETScreen. Considerando que, o FV dimensionado produz eletricidade entre as 9h-19h, em que, 2/3 deste intervalo de tempo são considerados horas cheias e 1/3 horas de ponta, determina-se que, o preço médio por kWh consumido é de 0,14439 €/kWh.

Tabela 10 - Valores obtidos para a instalação fotovoltaica de autoconsumo projetada.

Mês	Radiação solar diária - inclinada (kWh/m^2.dia)	Preço eletricidade (€/MWh)	Eletricidade produzida (MWh)	Valor (€)
Janeiro	2,80	144,39	2,626	379,19
Fevereiro	3,73	144,39	2,839	409,95
Março	5,02	144,39	3,849	555,80
Abril	6,18	144,39	4,145	598,54
Maio	6,88	144,39	4,405	636,08
Junho	7,04	144,39	4,193	605,47
Julho	7,22	144,39	4,455	643,30
Agosto	6,91	144,39	4,508	650,96
Setembro	5,74	144,39	3,986	575,58
Outubro	4,22	144,39	3,41	492,40
Novembro	3,13	144,39	2,756	397,97
Dezembro	2,58	144,39	2,485	358,83
Anual	**5,13**	**144,39**	**43,657**	**6304,07**

Pela tabela 10 verifica-se que o maior valor mensal foi em Agosto (650,96 €) e o mais baixo foi em Dezembro (358,83 €). Apesar de Dezembro ter sido o mês com menor produção energética, é importante salientar que, o valor atingido de 358,83 € não deixa de ser significativo. No gráfico da figura 59 verifica-se a variação de geração de energia mensalmente, observando-se uma produção anual de aproximadamente 44 MWh.
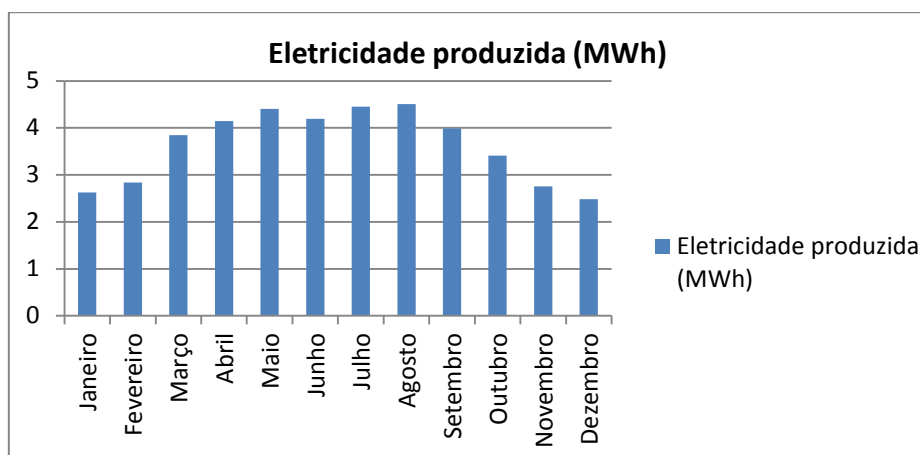
Figura 59 - Eletricidade produzida anualmente em MWh.

Da análise dos gráficos das figuras 58 e 59, verifica-se que os sistemas de autoconsumo de 20 kW dimensionados para as escolas públicas satisfazem uma média de 18,9% das necessidades energéticas mensais. É de notar que, este valor aumenta quando se considera apenas os períodos de funcionamento do FV, designadamente, nas horas cheias e de ponta, sendo suprimido nestes períodos, uma média mensal de 23,4% das necessidades energéticas do edifício escolar.

Analisando as faturas dos meses de verão (escolas encerradas) e considerando as percentagens de supressão das necessidades energéticas mensais, podemos afirmar que nunca haverá energia produzida excedente por parte do FV dimensionado.

Fazendo uma análise das reduções de emissões dos GEE aos resultados obtidos através do programa de simulação, provenientes da produção de energia fotovoltaica, verifica-se uma diminuição de cerca de 15,2 TCO_2 (valor da redução anual bruta de emissões de GEE). A tabela 11 possui alguns valores equivalentes às emissões evitadas.

Tabela 11 – Exemplos equivalentes às emissões de CO_2 evitadas [52].

Exemplos	Equivalência
Consumo de *diesel* evitado (litros)	6.531
Lixo reciclado (toneladas)	5,2
Lâmpadas incandescentes de 60 W ligadas durante uma hora	389.744
Floresta absorvendo dióxido de carbono (CO_2) (hectares)	1,4
Portáteis em funcionamento durante uma hora	292.308

A partir dos resultados obtidos na simulação, realizou-se uma análise a nível financeiro do projeto dimensionado, estudando a sua viabilidade financeira e o fluxo de caixa anual. Acerca da viabilidade financeira, verifica-se uma razão de custo-benefício (C-B) ao fim de 15 anos, de aproximadamente 2,2, significando este valor que, consegue-se mais do que duplicar o investimento inicial ao fim de 15 anos, o que é excelente, uma vez que, o sistema ainda está perfeitamente dentro da sua vida útil expectável (25 anos) [53]. O retorno do capital próprio investido inicialmente ocorre ao fim do 7º ano, conforme verificado pela tabela 12.

Tabela 12 - Fluxo de caixa anual.

Ano (#)	Após imposto (€)	Acumulativo (€)
0	-43.950	-43.950
1	6.304	-37.646
2	6.304	-31.342
3	6.304	-25.038
4	6.304	-18.733
5	6.304	-12.429
6	6.304	-6.125
7	6.304	179
8	6.304	6.483
9	6.304	12.787
10	6.304	19.091
11	6.304	25.396
12	6.304	31.700
13	6.304	38.004
14	6.304	44.308
15	6.304	50.612

Para avaliar o impacto que este sistema de autoconsumo tem na balança comercial da RAM, são interpretados os valores das tabelas 11 e 12, concluindo-se que, o custo de produção da quantidade de eletricidade fornecida pelo FV, através da combustão de *fuel* (1,458 €/L), tem o valor de 9.522,20 € anuais [54]. Até ao fim da vida útil do FV considerada neste caso, consegue-se uma poupança nos cofres da Região, na ordem dos 238.055 €.

Realizando uma análise de risco do retorno de investimento, verifica-se que este se situa à volta de 11,6%, podendo-se considerar o risco de retorno do investimento como baixo.

É importante referir que, no Anexo 5 está a caraterização dos equipamentos/componentes selecionados, para os FV dimensionados nos casos de estudo 1, 2, 3 e 4.

5.3 Caso de estudo 2 – Edifícios de serviços públicos

Neste caso de estudo analisa-se o impacto que um FV tem, de maneira a poder contribuir para a eficiência energética de um prédio público.

Nesta situação, define-se como exemplo universal fictício, um prédio que fornece serviços públicos em inúmeras áreas, com um total de 100 funcionários. O prédio conta com aproximadamente 18 salas de trabalho, 5 salas de atendimento público, 1 anfiteatros e arredores. É importante focar que o prédio localiza-se numa zona com bons índices de exposição solar.

Executaram-se então simulações no programa RETScreen com seguintes parâmetros: características dos painéis fotovoltaicos, fração solar, perfis de consumo a uma carga constante, localização, inclinação e orientação dos módulos solares, entre outros.

É importante mencionar que, como exceção o Centro das Artes Casa das Mudas está incluído na análise deste caso de estudo logo os seus resultados são fornecidos por defeito. Esta inclusão, nos casos dos edifícios de serviços públicos da zona do Funchal, é perfeitamente aceitável porque, pelo mapa de radiação solar anual (figura 7), a zona da Calheta possui melhores índices de radiação solar que o concelho do Funchal.

5.3.1 Caracterização dos prédios de serviços públicos

Trata-se de edifícios localizados na RAM, nas áreas do Funchal e da Calheta, apresentando valores de radiação solar global diária média anual de aproximadamente 4,4 kWh/m^2.dia, conforme demonstrado nos mapas de radiação da RAM (figura 7 e Anexos 1 e 2).

Na figura 56 estão os dados referentes à radiação solar horizontal e inclinada, onde se encontram os edifícios identificados anteriormente (Capítulo 3, Secção 3.2) e os possíveis locais de instalação dos FV.

5.3.2 Perfil de consumo dos prédios de serviços públicos

Como atrás mencionado, o estudo do tipo de utilização e consumo é um ponto fundamental para o dimensionamento dos FV, de forma a garantir as necessidades de consumo. Logo, analisou-se os consumos de eletricidade dos prédios de serviços públicos localizados em diversos pontos da RAM.

Do estudo das informações contidas na fatura de eletricidade deste tipo de prédios, e baseando-se em experiências e estudos anteriormente realizados, estimou-se uma despesa média mensal de aproximadamente 1.000€, sendo que, os períodos de maior consumo deram-se nas designadas Horas Cheias e nas Horas de Ponta, ou seja, os maiores consumos ocorreram nos períodos mais caros de faturação.

Esta afirmação é facilmente justificada, baseando-se nos períodos de funcionamento/atendimento/trabalho dos serviços públicos, sendo que os mesmos variam entre duas opções, ou seja, entre as 8h30-16h e entre as 9h-17h30, consoante o tipo de serviço ou atendimento público.

5.3.3 Solução fotovoltaica dimensionada para os edifícios de serviços públicos

Definindo que os edifícios públicos possuem contratos de potência com a EEM superiores a 41,4 kW, em tarifa de BTE e uma potência contratada de 120 kVA (120 kW para o fator de potência igual a 1), concluiu-se que a melhor solução seria um sistema fotovoltaico autónomo (autoconsumo) idêntico ao aplicado no caso de estudo 1, mas com uma potência máxima de 10 KW.

Resumidamente, as instalações elétricas presentes nos prédios públicos têm uma potência contratada de 120 kW, pelo que 10 kW são constantes, debitados pelo FV dimensionado.

Para a realização deste projeto, idealizou-se uma área com aproximadamente 77 m^2. Para esta solução se obtiveram três orçamentos diferentes de várias empresas do ramo das energias renováveis, em que, o primeiro orçamento tinha um custo total de 18.300 €, sendo este o preço praticado por uma empresa sediada em Portugal Continental; o segundo e terceiro orçamento foram de 22.000 € e 28.670 €, estando estas empresas sediadas na RAM. Assim, o valor de referência utilizado nos cálculos que se seguem é de 22.000€ e foi selecionado segundo vários critérios, como por exemplo, o preço/qualidade dos equipamentos do FV, ranking mundial dos PV, eficiência dos inversores, entre outros (Anexo 5).

A área necessária para a instalação deste sistema solar (77 m^2) está disponível em qualquer um dos prédios de serviços públicos identificados no Capítulo 3 (Secção 3.2). Neste sistema fotovoltaico de 10 kW, utilizou-se os mesmos tipos de componentes/equipamentos que o sistema projetado para os edifícios escolares públicos.

Na tabela 13 mostram-se alguns dados como, por exemplo, a radiação solar, eletricidade produzida e valores c/IVA, alcançados a partir da interpretação dos valores obtidos através da simulação do sistema fotovoltaico de autoconsumo de 10kW, realizada no programa RETScreen.

Tabela 13 - Valores obtidos para a instalação fotovoltaica de autoconsumo projetada.

Mês	Radiação solar diária - inclinada (kWh/m^2.dia)	Preço eletricidade (€/MWh)	Eletricidade produzida (MWh)	Valor (€)
Janeiro	2,80	144,39	1,458	189,6
Fevereiro	3,73	144,39	1,479	205,05
Março	5,02	144,39	1,88	277,83
Abril	6,18	144,39	1,86	299,34
Maio	6,88	144,39	1,841	317,97
Junho	7,04	144,39	1,697	302,81
Julho	7,22	144,39	1,823	321,58
Agosto	6,91	144,39	1,959	325,48
Setembro	5,74	144,39	1,888	287,79
Outubro	4,22	144,39	1,754	246,2
Novembro	3,13	144,39	1,514	198,98
Dezembro	2,58	144,39	1,403	179,49
Anual	**5,13**	**144,39**	**20,556**	**3152,12**

Pela tabela 13 observa-se que o melhor valor mensal foi no mês de Agosto (325,48 €) e o mais baixo foi em Dezembro (179,49 €). Apesar de Dezembro ter sido o mês com menor produção energética, é importante salientar que, o valor atingido de 179,49 €, não deixa de ser significativo relativamente à mensalidade recebida nos outros meses do ano. No gráfico da figura 60 verifica-se a variação de produção de energia mensalmente, observando-se uma geração anual de aproximadamente 22 MWh.
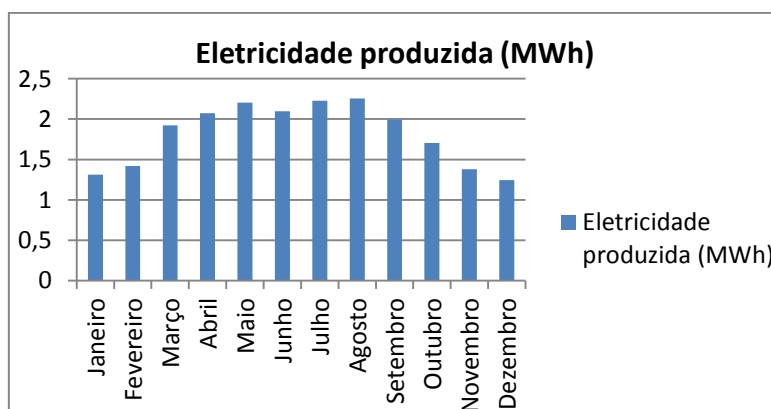
Figura 60 - Eletricidade produzida pela instalação de autoconsumo de 10 kW.

O sistema de autoconsumo de 10 kW foi dimensionado para fornecer, no mínimo, 24% das necessidades energéticas mensais destes tipos de prédios. Neste caso, diminuiu-se em 10 kW a potência dos sistemas de autoconsumo em relação aos implementados nas escolas, devido ao facto dos prédios com serviços públicos encerrarem normalmente às 18h e aos fins de semana. Como os FV ainda produzem energia depois desta hora e nos fins de semana, foi necessário ajustar a potência dos mesmos para suprir as necessidades energéticas mínimas do prédio (quando encerrado), eliminando assim qualquer perda de energia produzida pelo FV.

Fazendo uma análise às reduções de emissões dos GEE, através dos resultados simulados para a produção de energia fotovoltaica, verifica-se uma diminuição de cerca de 7,6 TCO_2/ano. A tabela 14 possui alguns valores equivalentes às emissões evitadas.

Tabela 14 – Exemplos equivalentes às emissões de CO2 evitadas [52].

Exemplos	Equivalência
Consumo de *diesel* evitado (litros)	3.266
Floresta absorvendo dióxido de carbono (CO_2) (acres)	1,6
Televisões em funcionamento durante 1 hora	146.154

A partir dos resultados obtidos na simulação, realizou-se uma análise a nível financeiro do projeto dimensionado, estudando a sua viabilidade financeira e o fluxo de caixa anual. Acerca da viabilidade financeira, verifica-se uma razão de custo-benefício (C-B) ao fim de 15 anos, de aproximadamente 2,1, duplicando o investimento inicial, o que é muito bom, uma vez que, o sistema ainda está perfeitamente dentro da sua vida útil expectável (25 anos). O retorno do capital investido inicialmente ocorre no fim do 7º ano, conforme verificado pela tabela 15.

Tabela 15 - Fluxo de caixa anual.

Ano (#)	Após imposto (€)	Acumulativo (€)
0	-22.000	-22.000
1	3.152	-18.848
2	3.152	-15.696
3	3.152	-12.544
4	3.152	-9.392
5	3.152	-6.240
6	3.152	-3.088
7	3.152	64
8	3.152	3.217
9	3.152	6.369
10	3.152	9.521
11	3.152	12.673
12	3.152	15.825
13	3.152	18.977
14	3.152	22.129
15	3.152	25.281

Para avaliar o impacto que este sistema de autoconsumo tem na balança comercial da RAM, são interpretados os valores das tabelas 14 e 15, concluindo-se que, o custo de produção da quantidade de eletricidade fornecida pelo FV, através de combustíveis fósseis, tem o valor de 4.761,83€ anuais. Até ao fim da vida útil do FV, consegue-se uma redução nas despesas da Região, na ordem dos 119.045,70€.

Realizando uma análise de risco do retorno de investimento, verifica-se que situa-se à volta de 11,5%, podendo-se considerar o risco de retorno do investimento como baixo. Para a avaliação do retorno de qualquer investimento, recorre-se à Taxa Interna de Retorno (TIR). Assim, realizou-se o gráfico da figura 61, para verificar a distribuição da TIR (após impostos) do capital investido inicialmente.
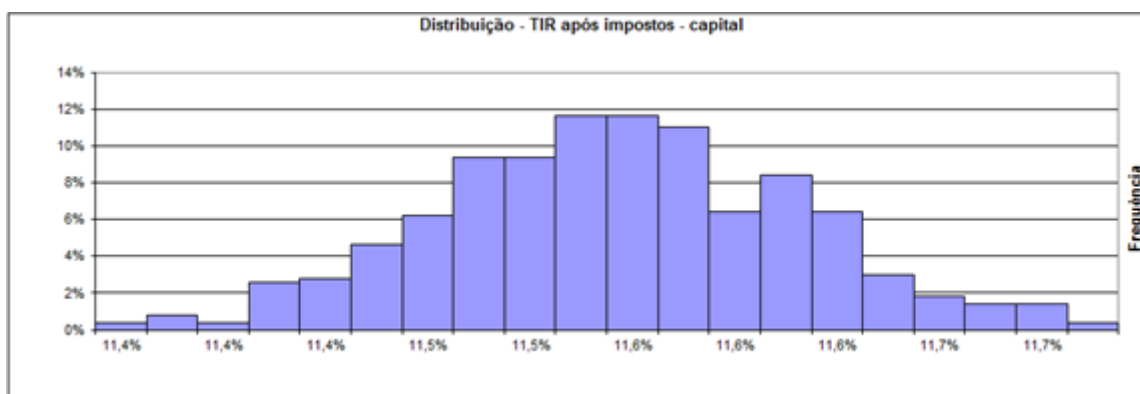
Figura 61 - Distribuição da TIR.

5.4 Caso de estudo 3 – Investimento global em sistemas fotovoltaicos nos edifícios selecionados na secção 3.2

Neste caso de estudo analisa-se o impacto que um grande investimento em FV teria na RAM, ou seja, estudar-se-ão as consequências da instalação de sistemas solares de autoconsumo em todos os edifícios públicos selecionados no Capítulo 3 (Secção 3.2), exceto o Complexo Piscinas Olímpicas do Funchal.

Assim, apresenta-se a tabela 16 que contém todos os edifícios públicos identificados, a potência máxima dos sistemas fotovoltaicos autónomos a instalar nos mesmos, os custos individuais das instalações fotovoltaicas e os seus totais.

Tabela 16 - Edifícios públicos selecionados.

	Edifícios Públicos	Potência do sistema fotovoltaico (kW)	Preço das instalações solares (€)	Área de instalação (m^2)
	DRQP	10	22000	77
	DRAC	10	22000	77
	Governo Regional	10	22000	77
	Centro das Artes Casa das Mudas	10	22000	77
	Edifício 2000	10	22000	77
	Hospital Dr. Nélio Mendonça	10	22000	77
	Escola Cristóvão Colombo	10	22000	77
	Escola Secundária Jaime Moniz	20	43950	153
	Escola Bartolomeu Perestrelo	20	43950	153
	Escola Horácio Bento	20	43950	153
	EBSC	20	43950	153
	Escola Básica dos Louros	20	43950	153
	Escola Francisco Franco	20	43950	153
	Escola Hoteleira	20	43950	153
	Conservatório – Escola das Artes	20	43950	153
	Escola Dr. Ângelo Augusto da Silva	20	43950	153
	Escola Gonçalves Zarco	20	43950	153
	Escola Santo António	20	43950	153
Total	18 Edifícios	290	637.450	2.222

Este investimento global, nos FV dimensionados para estes prédios, possuiria uma potência máxima total instalada de 290 kW e um custo de 637.450 €. Este investimento teria uma área de

instalação total de 2.222 m^2, disponível nos referidos prédios, e bons índices de exposição de radiação solar (superiores a 4,2 kWh/m^2.dia).

Para se avaliar a viabilidade de um investimento desta ordem, analisaram-se os valores globais de exposição à radiação solar de todos os sistemas fotovoltaicos, eletricidade total produzida e os valores c/IVA, obtidos através do programa de simulação, apresentando-os na tabela 17.

Tabela 17 - Valores obtidos para a instalação fotovoltaica de autoconsumo projetada.

Mês	Radiação solar diária - inclinada (kWh/m^2.dia)	Preço eletricidade (€/MWh)	Eletricidade produzida (MWh)	Valor (€)
Janeiro	2,80	144,39	32,38	4675,67
Fevereiro	3,73	144,39	35,01	5055,44
Março	5,02	144,39	47,45	6851,78
Abril	6,18	144,39	51,11	7380,28
Maio	6,88	144,39	54,31	7842,36
Junho	7,04	144,39	51,7	7463,48
Julho	7,22	144,39	54,92	7930,45
Agosto	6,91	144,39	55,57	8024,31
Setembro	5,74	144,39	49,15	7097,26
Outubro	4,22	144,39	42,04	6070,58
Novembro	3,13	144,39	33,98	4906,71
Dezembro	2,58	144,39	30,64	4424,42
Anual	**5,13**	144,39	538,24	77.722,74

Pela tabela 17 verifica-se que o melhor valor mensal foi no mês de Agosto (8.024,31 €) e o mais baixo foi em Dezembro. Apesar de Dezembro ter sido o mês com menor produção energética, é importante salientar que, o valor atingido de 4.424,42 € não deixa de ser significativo relativamente à mensalidade recebida nos outros meses do ano. No gráfico da figura 62 verifica-se a variação de geração de energia mensal, observando-se uma produção anual de aproximadamente 538 MWh.
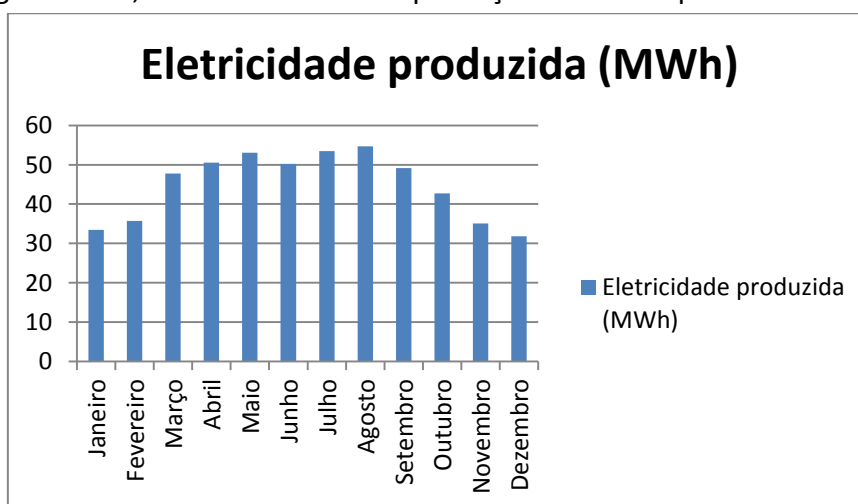
Figura 62 - Eletricidade produzida por todas as instalações de autoconsumo de 10 kW e 20 kW.

Fazendo uma análise às emissões dos GEE evitadas com a instalação dos FV dimensionados, verificava-se uma diminuição de cerca de 187,3 TCO_2/ano. A tabela 18 possui alguns valores equivalentes às emissões evitadas.

Tabela 18 - Exemplos equivalentes às emissões de CO2 evitadas [52].

Exemplos	Equivalência
Consumo de *diesel* evitado (litros)	80.349
Lixo reciclado (toneladas)	64,5
Lâmpadas incandescentes de 60 W ligadas durante uma hora	4.802.564
Floresta absorvendo dióxido de carbono (CO_2) (hectares)	17,2
Congeladores em funcionamento durante 1 hora	1.337.857
Aparelhos de ar condicionados em funcionamento durante 1 hora	360.192

A partir dos resultados obtidos na simulação, realizou-se uma análise a nível financeiro do projeto dimensionado, estudando a sua viabilidade financeira e o fluxo de caixa anual. Acerca da viabilidade financeira, verifica-se uma razão de custo-benefício (C-B) ao fim de 25 anos de vida útil total dos sistemas solares, de aproximadamente 3,1, o que é excelente, porque consegue-se mais do que triplicar o capital próprio inicial. O retorno do capital investido ocorre em meados do 8º ano, conforme verificado pela tabela 19 e figura 63 (gráfico de variação do fluxo de caixa anual acumulativo).

Tabela 19- Fluxo de caixa anual.

Ano (#)	Após imposto (€)	Acumulativo (€)
0	-637.450	-637.450
1	77.722	-559.728
2	77.722	-482.007
3	77.722	-404.285
4	77.722	-326.563
5	77.722	-248.842
6	77.722	-171.120
7	77.722	-93.398
8	77.722	-15.677
9	77.722	62.045
10	77.722	139.767
11	77.722	217.488
12	77.722	295.210
13	77.722	372.932
14	77.722	450.653
15	77.722	528.375
16	77.722	606.097
17	77.722	683.818
18	77.722	761.540
19	77.722	839.262
20	77.722	916.983
21	77.722	994.705
22	77.722	1.072.427
23	77.722	1.150.148
24	77.722	1.227.870
25	77.722	1.305.592
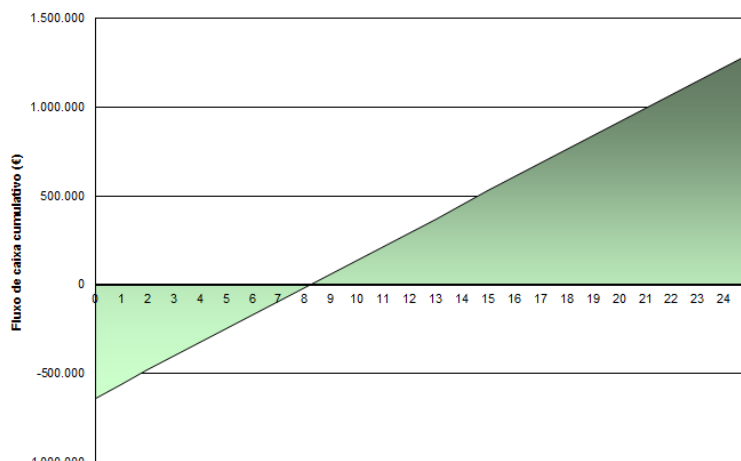
Figura 63 - Gráfico acumulativo do investimento global.

Para avaliar o impacto que este sistema de autoconsumo tem na balança comercial da RAM, são interpretados os valores das tabelas 18 e 19, concluindo-se que, o custo de produção da

quantidade de eletricidade fornecida pelo FV, através de combustíveis fósseis, tem o valor de 117.148,84€ anuais. Ou seja, até ao fim da vida útil do FV, a RAM consegue uma poupança total de 2.928.721,05€, derivada dos consumos de combustíveis fósseis (fuel) evitados, do decréscimo de importação dos mesmos e dos custos de toda a logística necessária para transformar estes combustíveis em energia elétrica.

Realizando uma análise de risco do retorno de investimento, verifica-se que se situa à volta de 11,4%, podendo-se considerar o risco de retorno do investimento como relativamente baixo.

5.5 Caso de estudo 4 – Investimento global em sistemas fotovoltaicos no Funchal e na Calheta

Neste caso de estudo analisa-se o impacto de um investimento em sistemas fotovoltaicos em todos os edifícios públicos do concelho da Calheta e da cidade do Funchal.

Na tabela 20 é apresentada uma contagem de todos os edifícios públicos identificados nestas zonas, potência máxima dos sistemas fotovoltaicos autónomos a instalar nos mesmos, áreas de instalação, custos das instalações fotovoltaicas, emissões de CO_2 e os seus totais.

Tabela 20 - Edifícios públicos selecionados.

Edifícios Públicos	Calheta (#)	Funchal (#)	Potência do FV a instalar (kW)	Área de instalação (m^2)	Potência total do FV instalados (kW)	Emissões CO_2 evitadas (TCO_2)	Preço das instalações solares (€)
Câmaras Municipais	1	1	10	154	20	15,2	44000
Centros de Saúde	7	10	10	1309	170	129,2	374000
Hospitais	0	2	10	154	20	15,2	44000
Escolas	12 (10 primárias e 2 secundárias)	46 (34 primárias e 12 secundárias)	20	8874	1160	881,6	2549100
Edifícios de serviços públicos (Segurança Social, Juntas de freguesia, etc.)	7	14	10	1617	210	159,6	462000
Edifícios da Sociedade de Desenvolvimento da Madeira	3	6	10	693	90	68,4	198000
Total	30	79	-----	12.801	1.670	1.269,2	3.671.100

O grande investimento global, nos sistemas fotovoltaicos dimensionados para os prédios do Funchal e da Calheta (tabela 20), possuiria uma potência máxima total instalada de 1.670 kW e um custo de 3.671.100 €. Este investimento teria uma área de instalação total de 12.801 m^2, disponível nos referidos prédios, e bons índices de exposição de radiação solar (superiores a 4.2 kWh/m^2.dia).

A partir da tabela 20 verifica-se uma diminuição de cerca de 1.269,2 TCO_2/ano. Na tabela 21 observa-se alguns valores equivalentes a estas emissões evitadas.

Tabela 21 – Exemplos equivalentes às emissões de CO2 evitadas [52].

Exemplos	Equivalência
Consumo de *diesel* evitado (litros)	545.236
Lixo reciclado (toneladas)	437
Lâmpadas de halogéneo ligadas durante uma hora	6.508.718
Floresta absorvendo dióxido de carbono (CO_2) (hectares)	116,7
Frigoríficos em funcionamento durante 1 hora	13.502.128
Máquinas de lavar a loiça em funcionamento durante 1 hora	2.789.451

Para se avaliar a viabilidade de um investimento desta ordem, analisou-se os valores globais de exposição à radiação solar de todos os sistemas fotovoltaicos, eletricidade total produzida e os valores c/IVA, obtidos através do programa de simulação, apresentando-os na tabela 22.

Tabela 22 - Valores obtidos para a instalação fotovoltaica de autoconsumo projetada.

Mês	Radiação solar diária - inclinada (kWh/m^2.dia)	Preço eletricidade (€/MWh)	Eletricidade produzida (MWh)	Valor (€)
Janeiro	2,80	144,39	182,7	26381,88
Fevereiro	3,73	144,39	197,6	28533,44
Março	5,02	144,39	267,8	38670,32
Abril	6,18	144,39	288,4	41644,96
Maio	6,88	144,39	306,5	44254,60
Junho	7,04	144,39	291,8	42135,92
Julho	7,22	144,39	310,0	44760
Agosto	6,91	144,39	313,7	45297,28
Setembro	5,74	144,39	277,4	40056,56
Outubro	4,22	144,39	237,3	34266,12
Novembro	3,13	144,39	191,8	27695,92
Dezembro	2,58	144,39	172,9	24966,76
Anual	**5,13**	**144,39**	**3.037,8**	**438663,76**

Pela tabela 22 verifica-se que o melhor valor mensal foi no mês de Agosto (45.297,28 €) e o mais baixo foi em Dezembro. Apesar de Dezembro ter sido o mês com menor produção energética, é importante salientar que, o valor atingido de 24.966,76 € não deixa de ser significativo, relativamente à mensalidade recebida nos outros meses do ano. No gráfico da figura 64 verifica-se a variação de produção de energia mensal, observando-se uma geração anual de aproximadamente 3.038 MWh.
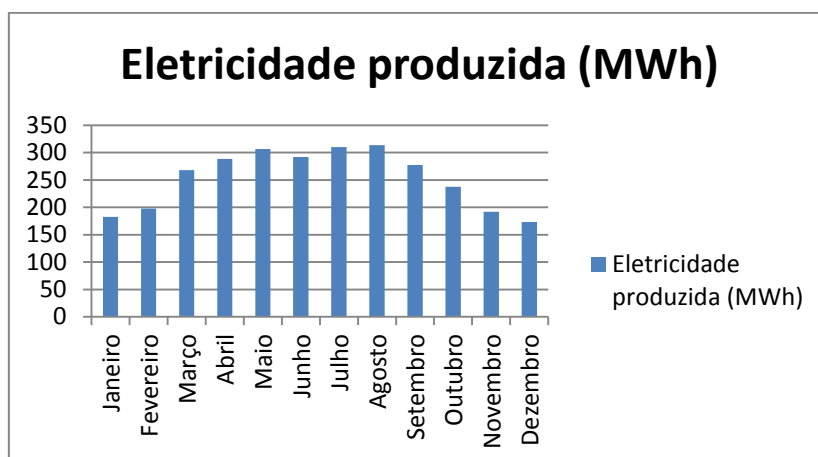
Figura 64 - Eletricidade produzida por todas as instalações de autoconsumo de 10 kW e 20 kW.

A partir dos resultados obtidos na simulação, realizou-se uma análise a nível financeiro do projeto dimensionado, estudando a sua viabilidade financeira e o fluxo de caixa anual. Acerca da viabilidade financeira, verifica-se uma razão de custo-benefício (C-B) ao fim de 25 anos de vida útil total dos sistemas solares, de aproximadamente 2,99, o que é excelente, porque consegue-se quase que triplicar o capital próprio inicial. O retorno do capital investido inicialmente ocorre no início do 8º ano, conforme verificado pela tabela 23 e figura 65 (gráfico de variação do fluxo de caixa anual acumulativo).

Tabela 23 - Fluxo de caixa anual.

Ano (#)	Após imposto (€)	Acumulativo (€)
0	-3.671.100	-3.671.100
1	438.663	-3.232.437
2	438.663	-2.793.774
3	438.663	-2.355.111
4	438.663	-1.916.448
5	438.663	-1.477.785
6	438.663	-1.039.122
7	438.663	-600.459
8	438.663	-161.796
9	438.663	276.867
10	438.663	715.530
11	438.663	1.154.192
12	438.663	1.592.855
13	438.663	2.031.518
14	438.663	2.470.181
15	438.663	2.908.844
16	438.663	3.347.507
17	438.663	3.786.170
18	438.663	4.224.833
19	438.663	4.663.496
20	438.663	5.102.159
21	438.663	5.540.822
22	438.663	5.979.485
23	438.663	6.418.148
24	438.663	6.856.811
25	438.663	7.295.474
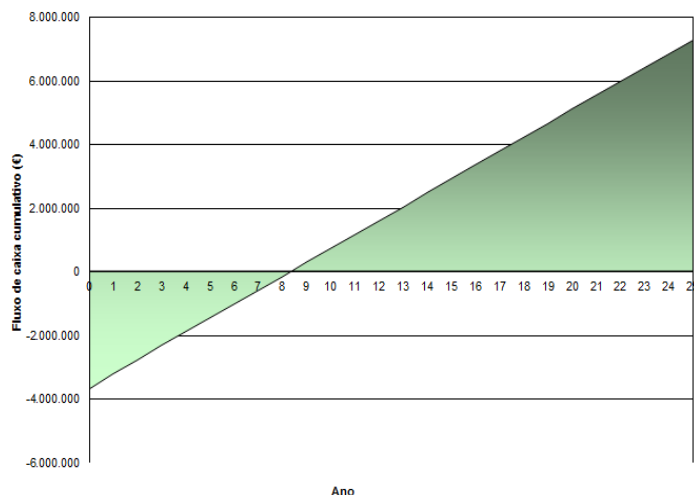
Figura 65 - Gráfico acumulativo do investimento global.

Para avaliar o impacto que este sistema de autoconsumo tem na balança comercial da RAM, são interpretados os valores das tabelas 21 e 23, concluindo-se que, o custo de produção da quantidade de eletricidade fornecida pelo FV, através de combustíveis fósseis, tem o valor de 794.954,09 €/ano. Ou seja, até ao fim da vida útil do FV, a RAM consegue uma redução nas despesas de operação na ordem dos 19.873.852,20€.

Realizando uma análise de risco do retorno de investimento, verifica-se que se situa à volta de 11,1%, considerando-se assim o risco de retorno do investimento como relativamente baixo.

5.6 Caso de estudo 5 – Investimento em instalações térmicas

Neste caso de estudo analisa-se o impacto que um sistema solar térmico tem, de maneira a poder contribuir para a classificação energética de um prédio público, através dos valores obtidos

pelo programa de simulação SolTerm, atendendo a que o consumo de águas quentes sanitárias (AQS) e aquecimento da água das piscinas atingem mais de 70% do total de energia consumida.

Nesta parte do trabalho são analisados 2 casos, o primeiro caso será respeitante a um pavilhão com uma piscina, localizado no ambiente escolar e com uma utilização regular por parte de alunos de escolas da RAM. No segundo caso será estudado o impacto num pavilhão com várias piscinas (Complexo Piscinas Olímpicas do Funchal), sendo este frequentado por atletas inscritos em clubes desportivos e público em geral. Estes pavilhões têm índices de exposição solar considerados bons para um investimento na área do solar térmico (médias anuais superiores a 4,2 kWh/m^2.dia).

Posteriormente executaram-se as simulações dos sistemas térmicos dimensionados, para os diferentes casos, no programa SolTerm. Para tal, foi realizado o seguinte procedimento:

- Executar o aplicativo SolTerm 5.1 e abrir o separador “Clima e local”;
- Selecionar o concelho do Funchal;
- Na configuração “Ajustes locais” selecionaram-se as seguintes opções:
    - Obstruções do horizonte: Por defeito;
    - Turbidez da atmosfera: Conteúdo médio em aerossóis e poluição (valor típico);
    - Albedo do solo: outras situações (valor típico – 20%);
- Gravaram-se os dados da radiação solar diária horizontal, temperatura ambiente, índice de claridade, etc.; através da opção “Guardar climatologia mensal”.

De seguida, configurou-se o sistema térmico a simular/implementar. Para tal, realizaram-se os seguintes passos:

- Selecionar o separador “Sistemas Térmicos”;
- Na secção “Projectos”, selecionou-se a opção de configuração “Sem depósito”;

Foi a selecionada a opção de configuração sem depósito uma vez que nos sistemas térmicos dimensionados para aquecimento da água das piscinas públicas, não há necessidade de um depósito de água uma vez que o sistema aquecerá a água diretamente, como num sistema de circulação forçada mas no lugar do depósito será a piscina (Figura 67).

- Carregou-se no ícone dos “Sistemas de Apoio” e selecionou-se “gás propano” como fonte calorífica secundária/auxiliar com um rendimento global predefinido de 75%;
- Depois programou-se no ícone “Consumo”, os consumos gerais (“Piscina Coberta”) e o número de nadadores (“Perfil de Consumo”), de acordo com o período horário diário e mensal (Tabela 24);
- No menu de escolha do “Equipamento”, foi selecionado a marca Vulcano, Modelo FKT – 1S/1W, com montagem fixa; Orientação: “Azimute Sul”; Inclinação: “27º” (configuração padrão);

O número de coletores a utilizar no sistema térmico a simular, varia consoante os perfis de consumo criados para cada caso de estudo desenvolvido posteriormente (2 casos). A quantidade de coletores foi definida de acordo com o parâmetro “Rendimento global anual do sistema”, sendo que, a que apresentava maiores percentagens de rendimento global anual, a selecionada para cada caso de estudo.

Após o processo de configuração do sistema térmico, a simulação foi realizada. Para tal foi realizado o seguinte processo:

- Selecionou-se o separador “Análise energética” (a simulação do sistema inicia automaticamente);

- Na caixa “Optimização sob critérios energéticos”, selecionou-se a opção “optimizar a orientação dos colectores” e, na caixa “Constrangimentos” assinalou-se “manter o azimute”;
- De seguida clicou-se no botão interativo “Optimizar”, para aperfeiçoar o sistema para a melhor configuração possível, em termos de inclinação.
- Nas opções “Gráficos” e “Guardar Relatório” foi possível armazenar os dados do sistema simulado, como por exemplo: o gráfico da radiação solar horizontal e à face dos coletores, energia fornecida pelo sistema solar e de apoio, em excesso, temperaturas, etc.; e o rendimento ótico, permutador utilizado, carga térmica, tubagens, balanço energético mensal e anual, entre outras, respetivamente.

Este separador mostra ainda a Produtividade (kWh/[m^2 coletor]) e a Fração solar (%). A fração solar é a percentagem da energia necessária fornecida pelo sistema solar para aquecer a água, ou seja, a fração solar representa a poupança. A experiência demonstra que a fração solar ótima, do ponto de vista económico, se situa entre os 60 e 80% das necessidades anuais [55].

Depois foi realizada uma análise económica ao sistema térmico dimensionado, através dos seguintes passos:

- Selecionou-se o separador “Análise económica”;
- Na caixa “Investimentos”, é estimado um valor do preço do sistema solar dimensionado. Ainda nesta caixa foi atribuído o custo de instalação do sistema solar (Componente fixa). Na secção dos “Incentivos” foi atribuído metade do valor do preço do sistema solar (50% comparticipado);
- Na caixa “Operação e manutenção” foram atribuídas as seguintes características:
    - Vida útil: 15 anos;
    - Manutenção anual: 0,2 % do preço do sistema.
- Na caixa “Valorização da energia”, foram fixados os valores do preço da energia substituída (1,50 €/kg de gás propano) e o custo da energia solar produzida (Regime BTN em Tarifa Simples – 0,1536 €/kWh);
- Na caixa “Cenário financeiro sobre 15 anos” foi definido o seguinte cenário:
    - Taxa de inflação média: 2,8 % ao ano;
    - Deriva média do preço da energia: 4,0 % ao ano.

O valor da deriva média do preço da energia diz respeito à variação média anual do custo do gás natural, utilizado como fonte secundária de aquecimento da água das piscinas. Este valor foi baseado nas últimas quatro variações/aumentos do preço do gás natural, sendo calculado através do seguinte raciocínio: $\frac{2{,}5+3{,}9+2{,}8+6{,}9}{4} = 4{,}025\%$ [56].

- Na caixa “Analisar interesse quando…” foi selecionada a opção “há capital disponível para investir”;
- Seguidamente clicou-se nos botões “Optimização económica” e “Guardar análise”, de forma a simular o cenário definido e guardar os resultados;

É então apresentado no interface gráfico a vantagem de utilização do sistema mencionada em €, se a instalação do sistema solar é ou não compensadora e, em que ano é recuperado o capital investido inicialmente (retorno).

Finalmente, é verificado o impacto ambiental que a implementação deste sistemas térmico, através das emissões de CO_2 e GEE evitadas. Para isso são realizados os seguintes passos:

- Selecionar o separador “Benefícios ambientais”;

- Na caixa “Benefícios Energia-Ambiente” é apresentado o consumo de energia primária de origem fóssil evitado e emissões de GEE evitadas;
- Clicou-se no ícone “Guardar análise” para gravar o relatório dos benefícios ambientais.

Com o processo de simulação concretizado foram analisados e interpretados os resultados e relatórios obtidos. Foi repetido este processo para cada um dos casos de estudo desenvolvidos, sendo que, alguns dos parâmetros como a taxa de inflação, deriva média do preço da energia, vida útil, ajustes locais, equipamento (Vulcano), entre outros; foram mantidos fixos.

5.6.1 Caracterização dos pavilhões das piscinas

Trata-se de edifícios localizados na RAM, nas áreas do Funchal e da Calheta, apresentando valores de radiação solar global diária média anual de aproximadamente 4,4 kWh/m^2.dia, conforme demonstrado nos mapas de radiação da RAM (figura 7 e Anexos 1 e 2).

Os dados da figura 66 advêm de um coletor da marca Vulcano Modelo FKT – 1S/1W, certificado e selecionado entre os existentes à venda no mercado, após a simulação inicial obrigatória no Solterm, com o coletor padrão (1 m^2 por pessoa). Os dados desta figura são referentes à radiação solar horizontal e inclinada para a área do Funchal, onde se encontram os edifícios identificados anteriormente (Secção 4.2) e os possíveis locais de instalação de coletores solares.
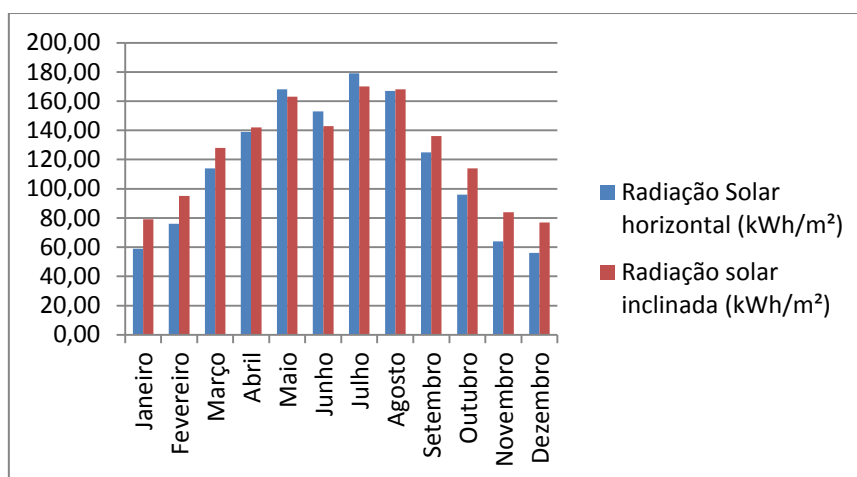
Figura 66 - Radiação solar horizontal e inclinada para o concelho do Funchal.

Comparando os valores da figura 66 com os obtidos para a radiação solar horizontal e inclinada dos painéis fotovoltaicos (figura 56), sobressai logo o facto dos painéis térmicos possuírem melhores índices de aproveitamento da radiação solar.

Como exceção, o pavilhão da piscina da Escola Secundária da Calheta está incluído nesta análise, sendo os seus resultados por defeito e justificada pelo mapa de radiação solar (figura 7), uma vez que, a área da Calheta possui índices de radiação solar melhores que a zona do Funchal.

5.6.2 Perfil de consumo dos pavilhões das piscinas

De acordo com o tipo de utilização e consumo a contribuição do sistema varia, sendo por isso um ponto fundamental para o dimensionamento dos sistemas solares térmicos, de forma a garantir as necessidades energéticas.

Este facto é uma das maiores incertezas por parte do projetista logo exige algum cuidado na especificação das cargas térmicas. Nesta análise variou-se a distribuição sobre o consumo diário e ao longo do ano, considerando dois tipos de casos sobre as utilizações das piscinas e afluência de nadadores, de acordo com a tabela 24.

Tabela 24 - Perfis de consumo (nadadores).

Hora	Caso 1	Caso 2
0-1	0	0
1-2	0	0
2-3	0	0
3-4	0	0
4-5	0	0
5-6	0	0
6-7	0	0
7-8	0	0
8-9	0	0
9-10	15	10
10-11	15	10
11-12	15	10
12-13	15	0
13-14	0	0
14-15	15	10
15-16	15	10
16-17	15	10
17-18	15	10
18-19	5	5
19-20	1	1
20-21	0	0
21-22	0	0
22-23	0	0
23-24	0	0

De forma a poder comparar os resultados obtidos pela análise, variou-se apenas o consumo nos meses do Verão, mantendo o mesmo número de nadadores e os mesmos períodos de funcionamento dos pavilhões.

No caso 1, o consumo é típico de uma utilização por parte de uma turma escolar de 15 alunos, que usa o sistema de manhã, antes do início das aulas de natação, mantendo o mesmo em funcionamento até depois da conclusão das aulas (aproximadamente 20h). É importante focar que, a partir das 18h teve-se em consideração uma utilização menos frequente de nadadores do que durante o período diurno e que, a piscina se encontra fechada entre as 13h-14h, mas com o sistema térmico sempre em funcionamento, exceto nos fins de semana. Este caso é direcionado para os pavilhões de piscinas da Escola Jaime Moniz e da EBSC.

O caso 2 é o caso típico de consumo do Complexo Piscinas Olímpicas do Funchal, que contém 4 piscinas para uso público, com uma utilização regular ao longo do ano, incluindo fins de semana. Esta utilização é justificada com a afluência do público às mesmas para lazer, treinos de equipas desportivas, provas de competição regionais, nacionais e internacionais, entre outras ocasiões.

5.6.3 Solução térmica dimensionada para os pavilhões das piscinas

A partir da tabela 24 verifica-se os padrões de utilização das piscinas, em que, para o caso 1, há a possibilidade de inserir 4 turmas diferentes, tendo cada turma, uma aula em bloco (2h). Para o caso 2, a piscina terá um funcionamento aberto ao público entre as 9h-12h e entre as 14h-20h. Durante os meses de verão, em ambos os casos, o número de nadadores/utilizadores aumenta assim

como os índices de radiação solar, sendo que, o sistema solar térmico dimensionado tem a capacidade de suportar um aumento de utilização até 33,3%.

A tabela 25 possui os valores da E_{solar}, rendimento e produtividade, obtidos para o coletor selecionado, com uma inclinação ótima (24°-28°), azimute Sul, sem obstrução significativa e com níveis de contaminação atmosférica de conteúdo médio em aerossóis e poluição (valor típico).

Tabela 25 - Valores dos sistemas solares projetados para ambos os casos de estudo.

Utilização	E_{solar} (kWh/ano)	Rendimento (%)	Produtividade (KWh/m^2)
Caso 1	33.147	58	865
Caso 2	70.641	60	895

De seguida mencionam-se alguns dos parâmetros comuns a ambos os casos, utilizados nas simulações no programa SolTerm, a nível das tubagens utilizadas:

- Comprimento total: 34 m;
- Percurso no exterior: 8,5 m com proteção mecânica;
- Diâmetro interno: 51 mm;
- Espessura do tubo metálico: 1,5 mm;
- Espessura do isolamento: 30 mm;
- Condutividade térmica do metal: 380 W/m/K;
- Condutividade térmica do isolamento: 0,03 W/m/K.

Ambos os sistemas solares térmicos têm um rendimento ótico de 80,3% e foram projetados para manter a temperatura da água das piscinas em 37°C, sendo esta, a temperatura recomendada para esta prática. É importante mencionar que, para o sistema solar térmico dimensionado para o caso 1, é necessário uma área de 38,3 m^2 (17 módulos solares) e, para o caso 2, uma área de 78,9 m^2 (35 módulos solares). Na figura 67 apresenta-se o esquema geral do sistema solar térmico projetado, sem depósito, para ambos os casos.
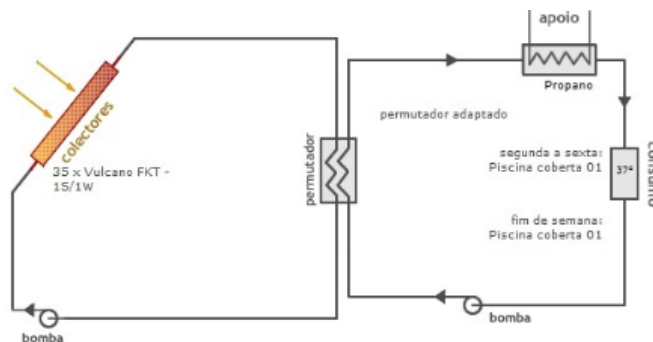
Figura 67 - Esquema geral de ligação do sistema térmico (caso 2).

De forma a avaliar a viabilidade dos projetos solares dimensionados fez-se a tabela 26 com alguns dados, como o preço/custo do sistema solar dimensionado, incentivos monetários, despesas evitadas, manutenções, reparações e retorno do capital investido, com base nos resultados obtidos através da ferramenta de simulação SolTerm. É importante referir que, os custos das reparações e os preços das instalações térmicas dimensionadas foram fornecidos pelo próprio programa de simulação.

Tabela 26 - Dados dos sistemas solares térmicos dimensionados.

Casos (#)	Preço (€)	Incentivos (€)	Despesas evitadas (€)	Manutenções (€)	Reparações (€)	Vantagem (€)	Retorno do capital (anos)
1	26.574	13.287	967.931	938	218	57.749	5
2	46.856	23.428	1.203.738	1.653	384	122.644	4

As tabelas 27 e 28 mostram os *cash-flows* dos sistemas térmicos dimensionados para o caso 1 e 2, respetivamente, para um cenário financeiro sobre 15 anos.

Tabela 27 - Cash-flow anual do sistema térmico do caso 1.

Ano (#)	Preço do sistema (€)	Incentivos (€)	Manutenção (€)	Reparações (€)	Energia não consumida (€)	Balanço anual (€)	Balanço acumulado simples (€)**
0	-26.574	13.287				-13.287	-13.287
1			-54		4.761	4.706*	-8.581
2			-55		4.989	4.934*	-3.647
3			-56		5.228	5.172*	1.525
4			-58		5.479	5.422*	6.947
5			-59		5.742	5.684*	12.631
6			60		6.018	5.958*	18.589
7			-61		6.307	6.246*	24.835
8			-62	-218	6.610	6.329*	31.164
9			-64		6.927	6.863*	38.027
10			-65		7.259	7.195*	45.222
11			-66		7.608	7.542*	52.764
12			-67		7.973	7.906*	60.670
13			-69		8.356	8.287*	68.957
14			-70		8.757	8.687*	77.644
15			-72		9.177	9.463	87.107

Tabela 28 - Cash-flow anual para a operação do sistema solar do caso 2.

Ano (#)	Preço do sistema (€)	Incentivos (€)	Manutenção (€)	Reparações (€)	Energia não consumida (€)	Balanço anual (€)	Balanço acumulado simples (€)**
0	-46856	23428				-23.428	-23.428
1			-96		9.549	9.453*	-13.975
2			-97		10.007	9.909*	-4.066
3			-99		10.487	10.388*	6.322
4			-101		10.991	10.889*	17.211
5			-103		11.518	11.415*	28.626
6			-106		12.071	11.965*	40.591
7			-108		12.650	12.543*	53.134
8			-110	-384	13.258	12.764*	65.898
9			-112		13.894	13.782*	79.680
10			-114		14.561	14.447*	94.126
11			-117		15.260	15.143*	109.270
12			-119		15.992	15.873*	125.143
13			-121		16.760	16.639*	141.782
14			-124		17.564	17.441*	159.222
15			-126		18.407	18.912	178.134

Os dados assinalados com *, são valores disponíveis para reinvestimentos a receber no final do período em análise, e ** é o balanço excluindo os reinvestimentos.

A partir dos dados das tabelas 27 e 28, estima-se uma redução anual na balança comercial da RAM para os casos 1 e 2 de, 6.746,07 € e 13.531,27 €, respetivamente. Considerando a esperança de vida útil média destes sistemas (> 15 anos), observa-se uma poupança total nas despesas da Região, na ordem dos 101.191 € e 202.969 € (energia não consumida), nos casos 1 e 2, concretamente [57]. Estas poupanças são conseguidas através da utilização dos sistemas térmicos dimensionados, que evitam a importação e uso do gás propano (2,25 €/kg) para aquecer a água das piscinas [58]. Estes valores das poupanças totais aumentam, quando o aquecimento da piscina é realizado através de eletricidade (combustíveis fósseis), para os valores das despesas evitadas (tabela 26), 967.931 € e 1.203.738 € para os casos 1 e 2, respetivamente.

Fazendo uma análise aos benefícios Energia-Ambiente, para o caso 1, evita-se o consumo de energia primária de origem fóssil de 136,16 GJ/ano, ou seja, 41.434 MWh/ano o que é equivalente a 3.174 kg de propano por ano. A nível de emissões de GEE evitadas, verifica-se uma diminuição de 9,40 TCO_2/ano. Para o caso 2, evita-se o consumo de energia primária de origem fóssil de 299,19 GJ/ano, ou seja, 83.108 MWh/ano o que é equivalente a 6.366 kg de propano por ano. A nível de emissões de GEE evitadas, observa-se uma redução de 18,85 TCO_2/ano. A tabela 29 possui alguns valores equivalentes às emissões evitadas.

Tabela 29 – Exemplos equivalentes às emissões de CO2 evitadas [52].

Exemplos	Caso 1 (#)	Caso 2 (#)
Lâmpadas incandescentes ligadas durante uma hora	241.026	483.333
Micro-ondas em funcionamento durante 1 hora	20.659	41.429
Frigoríficos em funcionamento durante 1 hora	100.000	200.532
Secadores de cabelo em funcionamento durante 1 hora	28.923	58.000
Aquecedores em funcionamento durante 1 hora	18.077	36.250
Televisores em funcionamento durante 1 hora	180.769	362.500

É importante referir que, independentemente das condições definidas nas simulações, como o preço do combustível atual e outros parâmetros, em ambos os casos, a instalação dos sistemas solares térmicos dimensionados são compensadoras. É também preciso ter em conta que, apesar do cenário financeiro ser de apenas 15 anos, a esperança de vida útil de um painel térmico é de aproximadamente 20 anos, o que melhora as hipóteses de retorno de um investimento nesta área.

No Anexo 6 estão os desempenhos detalhados dos sistemas térmicos para os casos 1 e 2.

5.6.4 Investimento global nos pavilhões das piscinas públicas da RAM

Nesta fase do trabalho analisa-se o impacto que tem um investimento grande em sistemas solares térmicos nos pavilhões das piscinas públicas da RAM, nomeadamente, no Complexo de Piscinas Olímpicas do Funchal, na piscina Jaime Moniz, na piscina da Levada, na piscina de Santa Cruz, na piscina de Machico, na piscina de Santana, na piscina da Ponta do Sol, na piscina da Calheta, na piscina de São Vicente, na piscina do Porto Moniz e na piscina do Curral das Freiras.

A piscina da Camacha não entra nesta análise porque já possui sistemas de aquecimento de água através de painéis solares, bem como sistemas de recuperação de calor, como sistema primário.

Realizou-se a tabela 30 para avaliar a viabilidade dos projetos solares dimensionados. Esta possui alguns dados dos sistemas térmicos dimensionados (casos 1 e 2) para as piscinas acima identificadas, como por exemplo, o preço do sistema solar dimensionado, incentivos monetários, despesas evitadas, manutenções, reparações, áreas de instalação, custos das instalações

fotovoltaicas, energia não consumida, emissões de CO_2 e os seus totais, com base nos resultados obtidos através da ferramenta de simulação SolTerm.

Tabela 30 - Investimento global nas piscinas públicas cobertas selecionadas.

	Piscina	Preço (€)	Incentivos (€)	Manutenção (€)	Despesas evitadas (€)	Energia não consumida (€)	Energia não consumida (kWh/ano)	Emissões evitadas (TCO_2/ano)
	Complexo de Piscinas Olímpicas do Funchal	46.856	23.428	1653	1.203.738	202.969	83.108	18,85
	Jaime Moniz	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Levada	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Santa Cruz	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Machico	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Santana	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Ponta do Sol	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Calheta	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	São Vicente	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Porto Moniz	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
	Curral das Freiras	26.574	13.287	938	967.931	101.191	41.434	9,40
Total	**11**	**312.596**	**156.298**	**11.033**	**10.883.048**	**1.214.879**	**497.448**	**112,85**

O grande investimento global, nos sistemas térmicos dimensionados para as instalações identificadas na tabela 30, teria um custo total de 312.596 € e uma área de instalação total de 461,9 m^2 (205 módulos), disponível nos referidos prédios. Através da figura 7, verifica-se que todos os prédios identificados têm bons índices de exposição de radiação solar (superiores a 4,2 kWh/m^2.dia).

A partir dos dados da energia não consumida, presentes na tabela 30, estima-se uma redução anual na balança comercial da RAM de 80.991,93 €. Considerando a esperança de vida útil média destes sistemas (> 15 anos), observa-se uma poupança total nas despesas da Região, na ordem dos 1.214.879 € [57]. Estas poupanças são conseguidas através da utilização dos sistemas térmicos dimensionados, que evitam a importação e uso do gás propano (2,25 €/kg) para aquecer a água das piscinas [58]. Estes valores das poupanças totais aumentam, quando o aquecimento da piscina é realizado através de eletricidade (combustíveis fósseis), para os valores das despesas evitadas, totalizando uma poupança de 10.883.048 €, até ao fim da esperança de vida comprovada para este tipo de equipamentos.

Fazendo uma análise aos benefícios Energia-Ambiente, evita-se o consumo de energia primária de origem fóssil de 497.448 MWh/ano o que é equivalente a 38.106 kg de propano por ano. A nível de emissões de GEE evitadas, observa-se uma redução total de 112,85 TCO_2/ano. A tabela 31 possui alguns valores equivalentes às emissões evitadas.

Tabela 31 - Exemplos equivalentes às emissões de CO2 evitadas [52].

Exemplos	Equivalência
Lâmpadas halogénio ligadas durante uma hora	578.718
Computadores em funcionamento durante 1 hora	482.265
Congeladores em funcionamento durante 1 hora	806.071

5.7 Discussão de resultados

A partir da análise dos estudos realizados nos casos de estudo 1 e 2, respeitantes à implementação de sistemas fotovoltaicos em prédios escolares e prédios com serviços públicos, concluiu-se que a melhor escolha seria um sistema solar para autoconsumo s/baterias.

O facto de se ter enveredado por esta escolha e a análise do consumo de energia destes edifícios, fez diminuir o preço da instalação devido à ausência de baterias na sua instalação, uma vez que, devido aos seus elevados consumos toda a energia produzida é consumida instantaneamente pela instalação elétrica. Também o facto de o preço das baterias ser alto e a sua vida útil ser muito baixo (entre 7 a 12 anos), assim como, a ausência de um limite de produção anual, como acontece nos casos de microprodução (2,4 MWh/ano) e miniprodução (2,6 MWh/ano), fizeram com que a opção de autoconsumo fosse a mais viável e com melhor retorno financeiro a curto prazo (7 anos para os casos 1 e 2; 8 anos para os casos 3 e 4). É importante referir que, os orçamentos selecionados para as instalações fotovoltaicas de 20 kW e 10 kW, já incluem contratos de manutenção de 5 anos e os valores apurados nos fluxos de caixa ou *cash-flows* já contêm as despesas de manutenção.

No 3º caso de estudo foi possível avaliar um investimento de larga escala na RAM ao nível da instalação de vários PV para autoconsumo. Dos resultados apurados neste caso de estudo, é possível afirmar que este investimento seria altamente viável, uma vez que, para o funcionamento durante toda a vida útil média estimada dos sistemas solares dimensionados (25 anos), consegue-se obter um lucro de cerca de 1.305.592 €. Com uma produção média anual de 538 MWh, reduz-se assim as emissões de GEE em 187,3 TCO_2/ano devido ao consumo evitado de energia derivada de combustíveis fósseis.

A partir dos resultados obtidos no 3º caso de estudo, expandiu-se a todos os edifícios públicos das zonas da Calheta e do Funchal, resultando o 4º caso de estudo. Neste caso de estudo comprovou-se que, um investimento em larga escala nestas duas áreas seria muito benéfico para a RAM, a nível económico e ambiental. Com excelentes resultados, como a redução de emissões de GEE em 1.269,2 TCO_2/ano, lucro final de 7.295.474 € e uma diminuição de 19.873.852,20 € na balança comercial, entende-se que, seria muito vantajoso um forte investimento em FV nos edifícios públicos de outras áreas/concelhos da RAM com índices de radiação solar anual igual ou superior aos verificados na Calheta e no Funchal (≥ 4,2 kWh/m^2.dia), ou seja, em quase toda a área da Ilha da Madeira.

No 5º caso de estudo, verificou-se o impacto que um sistema solar térmico teria em algumas instalações públicas, nomeadamente nos pavilhões com piscinas, como são os casos do Liceu Jaime Moniz, EBSC (caso 1) e, no Complexo das Piscinas Olímpicas do Funchal (Caso 2). Desta análise comprovou-se que, o retorno financeiro é alcançado em 5 e 4 anos para os casos 1 e 2, respetivamente. Assim, com um pequeno investimento, em relação ao custo total deste tipo de instalações, consegue-se manter em atividade as instalações durante a maior parte do seu período de funcionamento. É importante referir que, como o caso 1 é aplicado a escolas de diferentes zonas (Funchal e Calheta), no caso do sistema térmico a instalar na área da Calheta, o retorno do

investimento será mais rápido que o do Funchal, devido aos maiores índices de radiação solar que este concelho apresenta (Ponta do Pargo - tabela 5).

Ainda neste caso de estudo, comprovou-se que um investimento global com capital próprio em sistemas térmicos nos pavilhões de piscinas públicas da RAM é muito rentável, apresentando um retorno médio de 5 anos. Este investimento permite uma diminuição nas despesas públicas de aproximadamente 1.214.879 €, se o sistema de aquecimento for a gás e, se for através de eletricidade, de 10.883.048 €. A nível de emissões de CO_2 evitadas com a utilização destes sistemas, verifica-se uma redução total de 1.693 TCO_2 em 15 anos de funcionamento.

Capítulo 6 – Conclusões

6.1 Introdução

Neste capítulo, é realizado um conjunto de notas finais, de forma a esclarecer algumas das bases fundamentais, nas quais, toda esta tese assentou, concedendo credibilidade total a todos os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento da mesma.

Seguidamente, é efetuada uma avaliação do esforço despendido na realização da tese de mestrado, onde é realizada uma reflexão crítica sobre os vários estudos realizados nas diferentes etapas de construção da mesma, desde a fase de recolha de informação, introdução, seleção de tecnologias a implementar, condições de instalação (exposição e radiação solar) destas tecnologias, as suas evoluções em termos de eficiências e preços, casos de estudo, etc.

Por fim, são apresentadas algumas perspetivas para um futuro melhoramento e execução prática de algumas das soluções dimensionadas.

6.2 Notas finais

A classificação energética é obrigatória na construção, venda e remodelações significativas, encontrando-se relacionada e dependente do uso de painéis solares, ficando patenteado que, a sua contribuição é essencial para a melhoria da classe/eficiência energética de um prédio de qualquer tipo ou género.

Os programas de *software*, designadamente o SolTerm e o RETScreen, permitiram a simulação de alguns parâmetros fundamentais para os dimensionamentos das soluções térmicas e fotovoltaicas que melhor satisfaziam as necessidades energéticas das instalações públicas, assim como, a determinação de índices predefinidos associados ao desempenho do sistema solar projetado (inclinação e orientação dos coletores solares e PV). Assim, verificou-se que estas ferramentas de trabalho são muito úteis para a seleção das características dos sistemas solares dimensionados.

Algumas características do sistema solar, como efeitos de sombreamentos, poluição atmosférica e outras características técnicas dos sistemas de apoio, foram tidas em conta na simulação, graças às opções disponíveis nos programas de simulação.

A determinação dos perfis de consumo e utilização energética ao longo do ano, associados ao estudo dos prédios públicos, podem e devem ser definidas pelo projetista de modo a aproximá-las das condições reais, mas o dimensionamento final deve sempre ter em conta a tipologia da fração, de forma a proteger futuras aplicações, diferentes das que inicialmente planeadas.

Todas as soluções apresentadas tiveram sempre em conta o melhor preço disponível, a qualidade dos componentes e materiais constituintes dos sistemas solares, assim como, as melhores soluções de financiamento e apoios disponíveis, de forma a minimizar os custos totais dos sistemas dimensionados.

6.3 Conclusões

Esta foi uma tese de mestrado em que as principais decisões se comprovaram acertadas, desde a fase de estudos até às conclusões visto que, apesar de terem surgido novas propostas e sugestões para tecnologias solares e regimes de produção, os objetivos propostos inicialmente foram alcançados. Para tal, o tempo inicial despendido para efetuar pesquisas, analisar as ferramentas de trabalho (programas de simulação) e selecionar as tecnologias de energias renováveis existentes no mercado com bons retornos de investimento, na área da energia solar, foi

relativamente superior ao previsto mas crucial para o desenvolvimento da tese, revelando-se como as opções mais corretas.

A primeiro análise realizada foi a avaliação da radiação solar na RAM, na qual, se concluiu que a Ilha da Madeira é propícia para a instalações de painéis fotovoltaicos e térmicos, assim como outras tecnologias solares aliadas à exposição solar e ao número de horas de insolação. Isto porque a RAM tem bons valores de radiação solar média diária, registando-se 4 kWh/m^2.dia como o valor mínimo de radiação solar obtido entre os meses de Março a Outubro. Comprovou-se que, as zonas com valores médios anuais de radiação solar mais altos foram as áreas pertencentes ao Areeiro, seguido do concelho da Calheta.

Verificou-se que apesar da 1ª geração de painéis fotovoltaicos (silício cristalino) ser a mais antiga, esta é a que apresenta ainda os melhores resultados em termos de eficiência (≈ 15%), quando comparadas com os rendimentos dos painéis da 2ª geração (≈ 11%). Em termos de preços, a 2ª geração de painéis fotovoltaicos, designadamente os filme fino (silício amorfo), é melhor que a primeira, uma vez que, possui custos de aproximadamente 1 €/Wp, enquanto que, os painéis da 1ª geração têm custos de 2,7 €/Wp. Além disso, as tecnologias de 2ª geração têm uma maior longevidade e versatilidade de utilizações, podendo estas serem incluídas em fachadas de edifícios sem prejudicar a luminosidade no interior dos mesmos. Atualmente, ambas as tecnologias das duas gerações estão sendo utilizadas e empregues nas várias instalações fotovoltaicas em diversos pontos do globo, selecionando a tecnologia a utilizar consoante as suas condições, como o clima, utilização, verbas disponíveis, locais de implementação, etc.

A nível da 3ª geração de painéis fotovoltaicos, ainda é muito cedo para incluir as suas tecnologias num estudo deste calibre, devido simplesmente ao facto das mesmas serem ainda muito recentes e de haver muito pouca informação sobre as mesmas, além do preço e eficiências prováveis. Apesar disto, as mesmas revelam-se muito promissoras e capazes de revolucionar o mundo da energia solar tal como se conhece.

Devido à grande quantidade de temáticas e de níveis de aprendizagem, estipulou-se só se focar no contexto de produção de energia fotovoltaica em edifícios públicos mas com o decorrer dos estudos e com outras tecnologias de energia renovável solar, mais rentáveis e com melhor retorno de investimento, optou-se por outra solução, que contribui da mesma forma para a redução da dependência da RAM em relação aos combustíveis fósseis. Esta solução alternativa foi o sistema solar térmico, que satisfaz algumas das necessidades energéticas atuais dos edifícios públicos (pavilhões das piscinas) e, tornou esta tese mais interessante, atraente e com um conteúdo mais real, para futuras execuções práticas de projetos de energia solar na RAM.

Acerca da orientação das instalações solares, comprovou-se que estas podem possuir desvios até 15° do Sul, sem prejudicar a eficiência das mesmas, contudo, em caso de necessidade, verifica-se que estes desvios podem ir até ±45° sem grandes perdas de eficiência. Apesar de uma inclinação ótima seja de 5° abaixo da latitude do local de instalação para a captação máxima de radiação solar de um painel solar para uma utilização anual, comprovou-se que, inclinações que não ultrapassem os 45° (considerando a latitude do concelho do Funchal) não causam perdas relevantes de eficiência nos sistemas solares.

Na fase de seleção de prédios públicos com a dimensão e exposição solar apropriada deu-se mais ênfase aos prédios escolares devido ao contexto desta tese de mestrado e possuir mais informações energéticas sobre estes, selecionando ainda outros, de carácter público, nomeadamente, prédios com serviços prestados aos cidadãos comuns, a título extra. Outra das

razões foi o interesse demonstrado pelas várias entidades escolares que, ao longo do desenvolvimento deste estudo, prestaram, disponibilizaram, apoiaram, ofereceram, incentivaram e, por fim, demonstraram curiosidade no impacto que estas tecnologias solares teriam nas faturas de eletricidades mensais, se as mesmas estivessem em funcionamento nas suas instalações.

Da análise realizada aos diferentes regimes de produção no FV, verificou-se que atualmente os mesmos não são muito atrativos aos investidores, principalmente o regime de microprodução. Isto porque os tempos de retorno do investimento são elevados, entre os 8 a 10 anos (2013) e, principalmente, o preço pago por cada kWh produzido ser relativamente baixo e inferior ao valor pago por cada kWh consumido da rede pública. Assim, para voltar a ser apelativo este tipo de regime é necessário que, o preço pago por cada kWh produzido seja igual ou superior a 0,275 €, de forma a reduzir o prazo de retorno para valores inferiores a 6 anos, como verificado na melhor época dos sistemas fotovoltaicos (2008). Se considerar-se ainda a descida contínua do custo dos FV, o tempo de retorno diminuirá, tornando este regime ainda mais atrativo.

No entanto, com a subida progressiva dos preços da energia consumida por clientes BTN e a descida contínua do custo de sistemas fotovoltaicos para microprodução, foi estimado que, mantendo estas tendências e se se considerasse o preço da energia em BTN como valor pago por cada kWh produzido, em 2015, o tempo de retorno seria inferior a 5,5 anos.

Dos casos de estudo examinados, conclui-se que as tecnologias selecionadas para a implementação em qualquer situação analisada são benéficas em termos de eficiência e autonomia energética dos edifícios públicos da RAM, fundamentando esta conclusão através dos estudos económicos feitos para avaliar a viabilidade das soluções dimensionadas. Assim, da análise aos possíveis investimentos nas diferentes áreas estudadas, a nível das tecnologias fotovoltaica e térmica, verificou-se que a energia fotovoltaica é a tecnologia que possui uma relação quantidade/custo mais elevada, seguida da térmica. A propósito dos retornos de investimento, a tecnologia térmica é a que possui o tempo de retorno mais pequeno (entre 4 a 5 anos), seguida da energia fotovoltaica (entre 7 a 8 anos, em regime de autoconsumo).

Para generalizar, tomou-se o 3º caso de estudo como exemplo, expandindo para todas as zonas da Calheta e do Funchal, a instalação de FV em todos os prédios públicos destas áreas, resultando no 4º caso de estudo. Assim, no 4º caso de estudo foi possível observar o grande potencial solar das áreas estudadas comprovando-se que, se fosse realizado um investimento na ordem dos 3,671 M€, verificava-se o retorno do capital próprio investido inicialmente num espaço de 8 anos, uma diminuição nas emissões de CO_2 totais de aproximadamente 31.730 TCO_2, um lucro total de 7,295 M€ e uma redução nas despesas da RAM na ordem dos 19,874 M€, até ao fim da vida útil dos FV (≈ 25 anos).

A partir do 4º caso de estudo pode-se extrapolar para os restantes concelhos da RAM, incluindo a Ilha do Porto Santo, uma vez que a mesma possui valores médios diários mensais de radiação solar global superiores aos verificados na Ilha da Madeira (4,9 kWh/m^2.dia), que a aposta em FV para os edifícios públicos da RAM é benéfica e muito vantajosa em vários níveis, nomeadamente: económico, na diminuição da despesa corrente com importação de combustíveis fósseis para produção de eletricidade e lucros superiores ao dobro do capital próprio investido inicialmente; ambiental, com a redução das emissões de CO_2; autonomia, menor dependência de combustíveis fósseis; e maior aproveitamento dos recursos naturais ilimitados de forma sustentável e limpa. Com base nestes factos, afirma-se que os edifícios públicos da RAM têm um grande

potencial solar, com inúmeras vantagens, podendo-se estender a toda a RAM o tipo de soluções solares estudadas nesta tese (FV e Térmicos).

Todos os casos de estudo analisados tiveram em conta as necessidades energéticas de cada tipo de edifício público, tendo particular atenção a alguns edifícios cujo seu funcionamento é deficiente ou até mesmo inexistente, como é o caso de algumas infraestruturas públicas (pavilhões de piscinas) da Ilha da Madeira. É importante mencionar que, existe um fator que pode afetar o *cash-flow* de um investimento nesta área da energia solar, nomeadamente, alguma eventual avaria de um equipamento fora da garantia.

A respeito da tecnologia fotovoltaica, foi considerada a hipótese de aplicação do modelo Energy Service Company (ESCO). As empresas que trabalham no modelo ESCO, que ganham a concessão de instalação de determinado projeto de sistema solar num prédio público, afirmam que, muitas vezes o tempo de exploração concedido serve apenas para recuperar o investimento feito, com pouco ou mesmo nenhum lucro. Observando a outra parte do acordo, após este tempo de exploração, os sistemas mudam de posse, passando do domínio privado para o público mas, com o fator deste sistema instalado já não estar abrangido por qualquer tipo de garantia ou manutenção, assim com, menores valores de eficiência. Assim e, devido às dificuldades e constrangimentos legislativos, particularmente em Portugal, esta hipótese foi abandonada neste estudo.

A possibilidade de um investimento massivo, como o presente no 4º caso de estudo ou até mesmo no 5º caso de estudo (Capítulo 5, Secções 5.5 e 5.6.4), poderá proporcionar uma economia de escala, derivada da compra de todos os equipamentos necessários para a aplicação destes sistemas nos edifícios públicos selecionados, através de um plano integral, poderia usufruir de um desconto sobre o preço total orçamentado de aproximadamente 20%. Este desconto teria um impacto relevante no retorno do investimento, nomeadamente, no 4º caso de estudo (FV), em que o tempo de retorno reduzir-se-ia de 8 para 6 anos e meio e, no 5º caso de estudo (Térmico), este tempo diminuiria de 5 para 4 anos. É de notar que, os preços finais das instalações solares para ambos os casos reduziriam para 2.936.880 € e 250.077 €, respetivamente.

É importante mencionar que, tendo a hipótese de utilizar a tecnologia térmica com tubos de vácuo na solução apresentada para os pavilhões das piscinas, optou-se simplesmente pela tecnologia de painéis planos porque esta tem incentivos por parte do Estado até 50% do custo do sistema, enquanto que, os sistemas térmicos de tubos de vácuo apesar de serem os mais indicados para o aquecimento de águas das piscinas, não estão englobados nestes incentivos ou possuem qualquer tipo de ajuda, de momento. Já os FV dimensionados, podem ser submetidos a apoios de programas da UE e, em caso de deferimento, estes podem atingir cerca de 50% do investimento total inicial (por exemplo, o programa de financiamento Horizonte 2020).

Finalmente, afirma-se que uma maior eficiência energética leva a menores gastos em energia por parte dos utilizadores, mantendo os mesmos níveis de segurança e conforto. Esta redução é alcançada não só pelo recurso às energias renováveis mas também pelas boas práticas de utilização e organização dos períodos de funcionamento dos edifícios públicos da RAM, de forma a tornarem-se mais eficazes em termos de consumo energético.

6.4 Perspetivas futuras

Futuramente, podem ser realizadas adições, adaptações e possíveis melhorias neste estudo, muito facilmente, de forma a adequar algumas das soluções projetadas a outros casos semelhantes de edifícios públicos ou, quiçá, privados.

A análise económica apresentada poderá ser melhorada e adaptada às diferentes condições financeiras ou preferenciais, alterando os componentes das soluções dimensionadas para outros com menor eficiência ou de qualidade inferior, baixando os custos totais de um investimento desta dimensão na área de energias renováveis. Outros parâmetros, como contratos de manutenção e assistência destes investimentos a longo prazo, podem ser considerados no orçamento dos sistemas solares.

Também seria interessante e até revelador desenvolver um estudo que analisasse, de uma forma mais extensa, o período de vida útil dos componentes das instalações solares e até possíveis simulações sobre valores e taxas de juro de empréstimos bancários disponíveis para o financiamento de projetos nesta área.

A tecnologia de tubos solares está a ganhar proporções consideráveis no mercado das energias renováveis, sendo que, a adição deste tipo de tecnologia poderia enriquecer o conteúdo deste trabalho e, principalmente contribuir para a eficiência e autonomia energética dos edifícios públicos da RAM.

Posteriormente, a execução prática de algumas das situações citadas nos casos de estudo é o patamar seguinte, na conquista do objetivo que se definiu, enquanto país membro da UE, para diminuir as emissões e dependência de combustíveis fósseis como energia primária consumida.

É importante mencionar que, parte do conteúdo desta tese de mestrado (Capítulo 4) foi submetido como objeto de artigo científico designado ”*On the actual payback period for small investors in the photovoltaic systems in Portugal*”, a apresentar na conferência Porto Controlo 2014, intitulada “11th Conference on Automatic Control”, tendo já obtido aceitação por parte da organização deste evento [59]. O Anexo 7 possui o artigo científico submetido à conferência Porto Controlo 2014, na íntegra.

Referências Bibliográficas

[1] Portugal é o quarto país mais perto de alcançar metas de renováveis da UE para 2020 - Museu da Electricidade, http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Portugal_%C3%A9_o_quarto_pa%C3%ADs_mais_perto_de_alcan%C3%A7ar_metas_de_renov%C3%A1veis_da_UE_para_2020, consultado a 10/04/2014.

[2] Castro, Rui, "Uma introdução às energias renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica". Lisboa, IST Press, 2011.

[3] EEM - Empresa de Electricidade da Madeira, http://www.eem.pt/, consultado a 12/07/2013.

[4] Portugal bateu recorde de energia renovável em 2013 | Green Savers, http://greensavers.sapo.pt/2014/01/14/portugal-bateu-recorde-de-energia-renovavel-em-2013, consultado a 10/04/2014.

[5] Edifícios e Energia - 70 mil milhões para o Horizonte 2020, http://edificioseenergia.pt/pt/noticia/70-mil-milhoes-para-o-horizonte-2020, consultado a 12/07/2013.

[6] Suave Clima, http://www.suaveclima.pt/ficheiros/galeria_92_1.pdf, consultado a 12/07/2013.

[7] Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalação, Eng. Miguel Costa, Lisboa, 2004.

[8] Magro, Carlos; Vásquez, Manuel; Belmonte, Pablo; Navarro, José e Cerqueira, Maria, "Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira". Funchal, LREC, 2008.

[9] *NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data*, https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=32&lon=16&submit=Submit, consultado a 12/07/2013.

[10] Ervilha, Ana e Pereira, José, "Avaliação do Potencial Energético Solar na Região Autónoma da Madeira". ERAMAC – Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia; e AREAM – Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira, Funchal, 2005.

[11] *Madeira Weather :: Calheta :: Estreito da Calheta :: Temperature Summary*, http://www.mad-weather.com/temp_summary.php?r=temp_summary.php, consultado a 12/07/2013.

[12] *World Weather Information Service – Funchal*, http://worldweather.wmo.int/003/c00005.htm, consultado a 12/07/2013.

[13] Sistema de Informação Geográfico Fotovoltaico, JRC's Institute for Energy and Transport - PVGIS - European Commission, http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/, consultado a 12/07/2013.

[14] Decreto-lei n.º 25/2013, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, consultado a 12/07/2013.

[15] Microprodução - Despacho DGEG de 26 de dezembro de 2013, http://www.consumorigem.com/doc2/Desp%20DGEG%20-%20Micro%202014.pdf, consultado a 10/04/2014.

[16] Decreto-lei n.º 34/2011, http://www.dre.pt/pdf1s/2011/03/04700/0131601325.pdf, consultado a 12/07/2013.

[17] Miniprodução - Despacho DGEG de 26 de dezembro de 2013, http://www.consumorigem.com/doc2/Desp%20DGEG%20-%20Mini%202014.pdf, consultado a 10/04/2014.

[18] composiçãodosistemamicroprodução.jpg (2480×1661), http://www.solarwaters.pt/images/composi%C3%A7%C3%A3odosistemamicrogera%C3%A7%C3%A3o.jpg, consultado a 12/07/2013.

[19] Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares, http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/, consultado a 12/07/2013.

[20] Painéis Fotovoltaicos - Os melhores preços em painéis solares fotovoltaicos em Portugal, http://www.paineisfotovoltaicos.com/, consultado a 12/07/2013.

[21] Gnoatto, Estor; Dallacort, Rivanildo; Ricieri, Reinaldo; Silva Suedemio e Ferruzi, Yuri, "Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel". Brasil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2008.

[22] Manual de Instalações Solares Térmicas, INETI, Portugal, Lisboa, 2007.

[23] Camacho, Gonçalo, "A energia solar e a utilização racional de energia em edifícios de acordo com os regulamentos em vigor", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, 2013.

[24] Descrição e informações para a montagem dos sistemas de energia Solar Fotovoltaica, http://www.portal-energia.com/descricao-e-informacoes-para-a-montagem-dos-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica/, consultado a 10/04/2014.

[25] Doninelli, Mario; Doninelli, Marco, "As Instalações Solares – Técnicas e esquemas de realização". Portugal, Maia: Editora Caleffi, 2006.

[26] Radiadores de design, os mais originais e sofisticados!, http://www.decoralis.com.pt/radiadores-de-design-os-mais-orginais-e-sofisticados-00411/, consultado a 12/07/2013.

[27] Termossifão_300L.JPG (1024×768), http://server.masterprohosting.com/~planobp/upload/Termossif%C3%A3o_300L.JPG, consultado a 12/07/2013.

[28] STermocifao_2.jpg (339×229), http://www.arunclima.pt/images/STermocifao_2.jpg, consultado a 12/07/2013.

[29] Ligação entre coletores (painéis) solares térmicos planos e de tubos de vácuo . – dicasesquemas, http://dicasesquemas.blogs.sapo.pt/44809.html, consultado a 12/07/2013.

[30] Tubos solares híbridos geram eletricidade e aquecem água | Tecnologias de último grito, http://www.tecnologiasdeultimogrito.com/tubos-solares-hibridos/, consultado a 12/07/2013.

[31] Decreto-lei n.º 80/2006, http://www.dre.pt/pdf1s%5C2006%5C04%5C067A00%5C24682513.pdf, consultado a 12/07/2013.

[32] Guia do Usuário – Quantum GIS, Versão 1.7.4 'Wroclaw', Brasil, Maio de 2012.

[33] Ortofotomapa – Wikipédia, a enciclopédia livre, http://pt.wikipedia.org/wiki/Ortofotomapa, consultado a 12/07/2013.

[34] Matos, João, "Modelos Digitais de Terreno", Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Instituto Superior Técnico (IST), 2007.

[35] Oliani, Luiz; Paiva, Caio; Antunes, Alzir; "Utilização de Softwares Livres de Geoprocessamento para Gestão Urbana em Municípios de Pequeno e Médio Porte", Departamento de Geomática - Sector de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2012.

[36] Manual de Instalação e Utilização do *software* SolTerm, Versão 5.1.4, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, 2012.

[37] *RETScreen International Home*, http://www.retscreen.net/ang/home.php, consultado a 12/07/2013.

[38] *WGS84 - World Geographic System*, http://www.isa.utl.pt/dm/sig/sig20002001/TemaSGR/wgs84.html, 10/04/2014.

[39] Ferreira, Hellen; Santos, Marconi; "SIG aplicado a gerência de rede de distribuição elétrica rural da área litorânea de Utinga, Localizada nos Municípios do Conde e Alhandra - PB", Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia em Geoprocessamento (IFPB), 2010.

[40] Chang, Aileen; Parrales, Maria; Jimenez, Javier; Sobieszczyk, Magdalena; Scott, Hammer; Copenhaver, David; Kulkarni, Rajan; "*Combining Google Earth and GIS mapping technologies in a dengue surveillance system for developing countries*", *International Journal of Health Geographics*, Colômbia, 2009.

[41] Ávila, Weiller; Oliveira, Lorrayne; "Uso do Quantum GIS e Google Earth para delimitação e análise de áreas de preservação permanentes da sub-bacia do córrego Água Branca em Goiânia", Universidade Federal de Goiás (UFG), 2013.

[42] Zambelli, Pietro; Lora, Chiara; Spinelli, Raffaele; Tattoni, Clara; Vitti, Alfonso; Zatelli, Paolo; Ciolli, Marco; "*A GIS decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production*", *Environmental Modelling and Software*, *Volume 38*, 2012.

[43] Nova impressora fotovoltaica imprime uma célula solar a cada dois segundos | Green Savers, http://greensavers.sapo.pt/2013/08/13/nova-impressora-fotovoltaica-imprime-uma-celula-solar-a-cada-dois-segundos/, consultado a 12/07/2013.

[44] Decreto-Lei n.º 363/2007, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, consultado a 12/07/2013.

[45] Decreto-Lei n.º 118-A/2010, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, consultado a 12/07/2013.

[46] FactorENERGIA com primeira instalação de fotovoltaicos em autoconsumo na RAM, http://www.factorenergia.pt/instalacao-autoconsumo.html, consultado a 12/07/2013.

[47] Portaria n.º 764/2002, http://www.dre.pt/pdf1s/2002/07/149B00/51305131.pdf, consultado a 12/07/2013.

[48] Eugénio O. G. da Rosa, 17 de Setembro de 2010, "Preços da Energia em Portugal", www.eugeniorosa.com/Sites/eugeniorosa.com/Documentos/2010/41-2010-Preço-energia-Portugal-muito superior-UE27.pdf, consultado a 12/07/2013.

[49] Preço da electricidade pode subir 2,8% em Janeiro - Renascença, http://rr.sapo.pt/informacao_detalhe.aspx?fid=24&did=125806, consultado a 15/10/2013.

[50] PrestEnergia, http://www.prestenergia.com/ficheiros/conteudos/files/Autoconsumo.pdf, consultado a 12/07/2013.

[51] Portal ERSE - Portal ERSE - Bem-vindo ao portal da ERSE, http://www.erse.pt/consumidor/electricidade/querosercliente/tenholigacaoarede/Documents/Documento_CiclosHor%C3%A1rios_Electricidade.pdf, consultado a 12/07/2013.
[52] Custo e emissões de CO_2 dos eletrodomésticos, http://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/table_appliances_pt.pdf, consultado a 12/07/2013.
[53] TemplarLUZ - Energias Renováveis - Nova Legislação Microprodução, http://www.templarluz.com/area.php?var=renovaveis, consultado a 12/07/2013.
[54] Direção Regional do Comércio, Indústria e Energia, http://drcie.gov-madeira.pt/drcie/index.php, consultado a 12/07/2013.
[55] Energia polar.pdf, www.cm-seixal.pt/ameseixal/municipe/energiasRenovaveis/documentos/EnergiaSolar.pdf, consultado a 10/04/2014.
[56] Gás natural sobe 2,8% em janeiro. É o terceiro aumento num ano - Dinheiro Vivo, http://www.dinheirovivo.pt/Empresas/Artigo/CIECO308617.html, consultado a 10/04/2014.
[57] Projetos Prioritários do Plano de Sustentabilidade – Concelho de Bragança, ”Eixo Estratégico 3 – Metabolismo da Eficiência Energética”, http://www.cm-braganca.pt/document/448112/agd21_f12.pdf, consultado a 12/07/2013.
[58] PORDATA - Preços médios de venda ao público dos combustíveis líquidos e gasosos – Continente em Portugal, http://www.pordata.pt/Portugal/Precos+medios+de+venda+ao+publico+dos+combustiveis+liquidos+e+gasosos+%20+Continente-1265, consultado a 12/07/2013.
[59] Controlo 2014, http://paginas.fe.up.pt/~controlo2014/, consultado a 10/04/2014.
[60] pr.JPG (400×300), http://projetolabfisica.zip.net/images/pr.JPG, consultado a 12/07/2013.
[61] dsc_0097.jpg (500×755), http://www.asknature.org/images/uploads/product/b57e64dd3a2a1a9d36a92a5a51ef7293/dsc_0097.jpg, consultado a 12/07/2013.
[62] 29214_large_main.JPG (3648×2736), http://images.dailytech.com/nimage/29214_large_main.JPG, consultado a 12/07/2013.
[63] Poupar com o Autoconsumo, http://www.prestenergia.com/ficheiros/conteudos/files/Autoconsumo.pdf, consultado a 12/07/2013.
[64] Bosch Solar Module M240, http://pt.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/solar_modules/portugal/Bosch_240_KD18015_PT_01.pdf, consultado a 10/04/2014.
[65] 680_Bosch_MonoM60_BA_nl - PANEL SOLAR.jpg (450×450), http://www.inducam.cl/fotos/680_Bosch_MonoM60_BA_nl%20-%20PANEL%20SOLAR.jpg, consultado a 10/04/2014.
[66] sunny-tripower2.png (335×270), http://www.sma-uk.com/fileadmin/fm-dam/products/pages/sunny-tripower2.png, consultado a 10/04/2014.
[67] SMA_SunnyBeam_Bluetooth.jpg (420×263), http://www.altestore.com/store/descfiles/sma/SunnyBeam/SMA_SunnyBeam_Bluetooth.jpg, consultado a 10/04/2014.

ANEXOS

Anexo 1 – Mapas mensais da radiação solar total
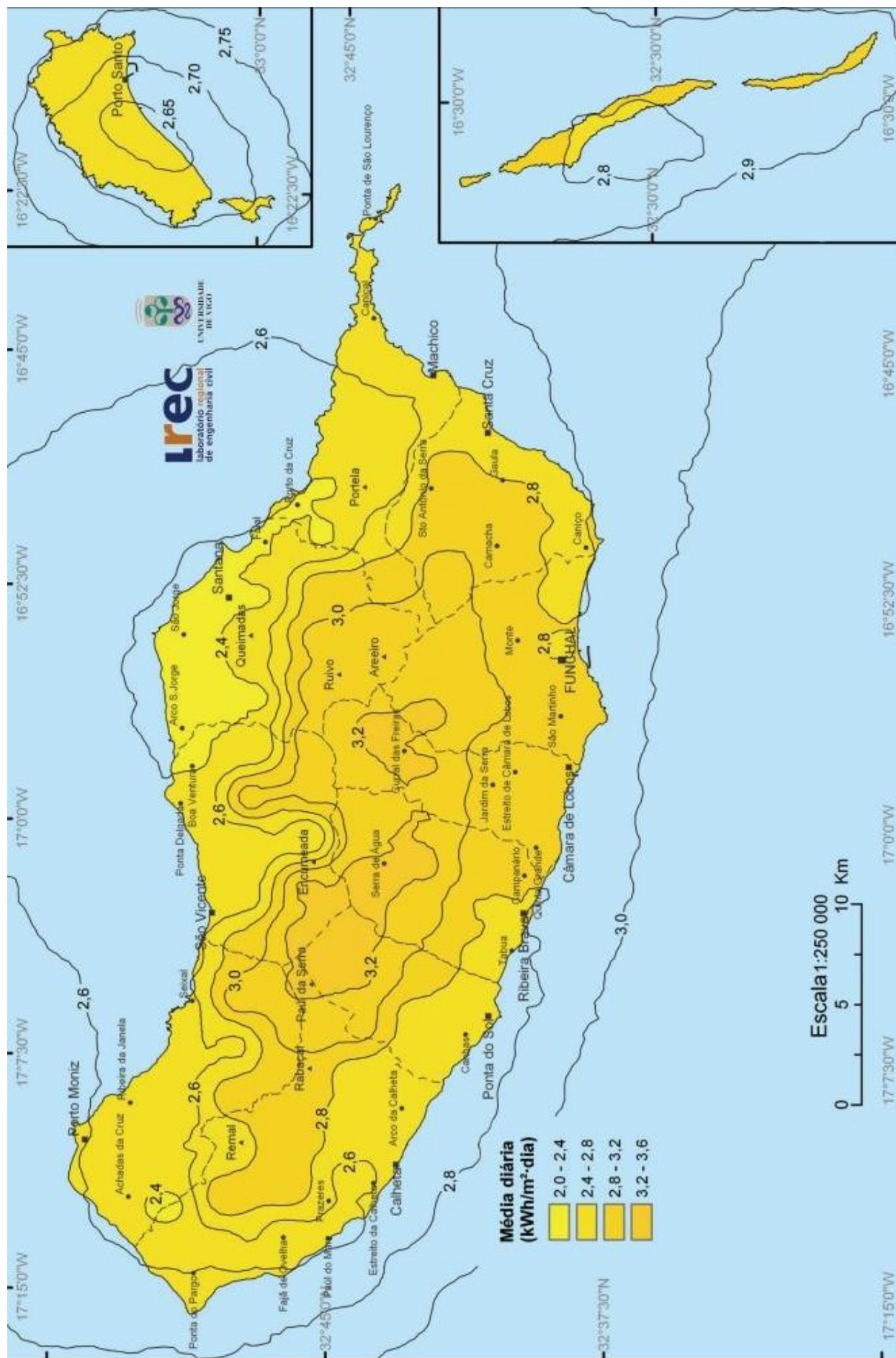
Figura 68 - Radiação Solar Total – Janeiro [8].

Figura 69 - Radiação Solar Total – Fevereiro [8].

Figura 70 - Radiação Solar Total - Março [8].

Figura 71 - Radiação Solar Total - Abril [8].
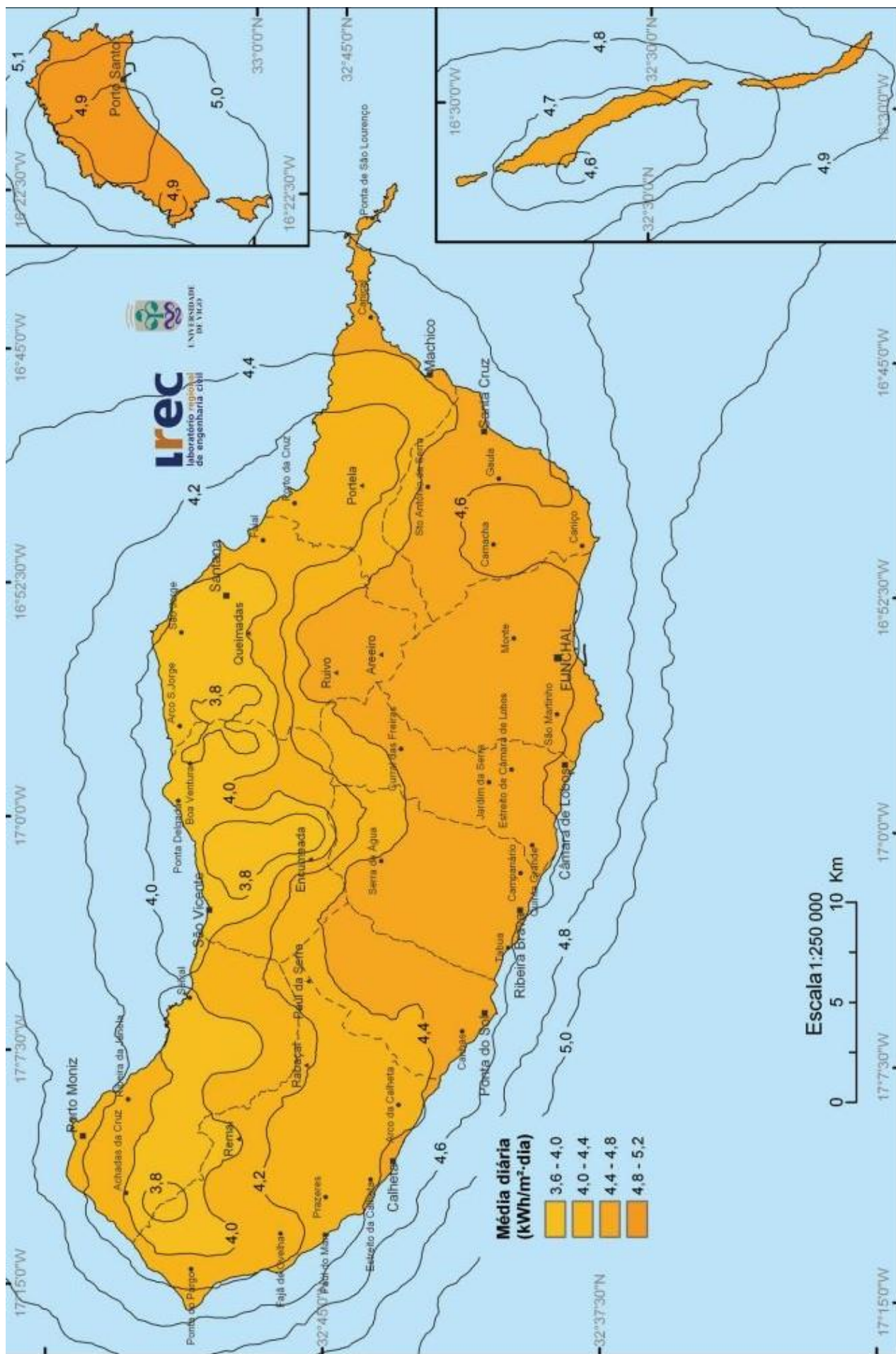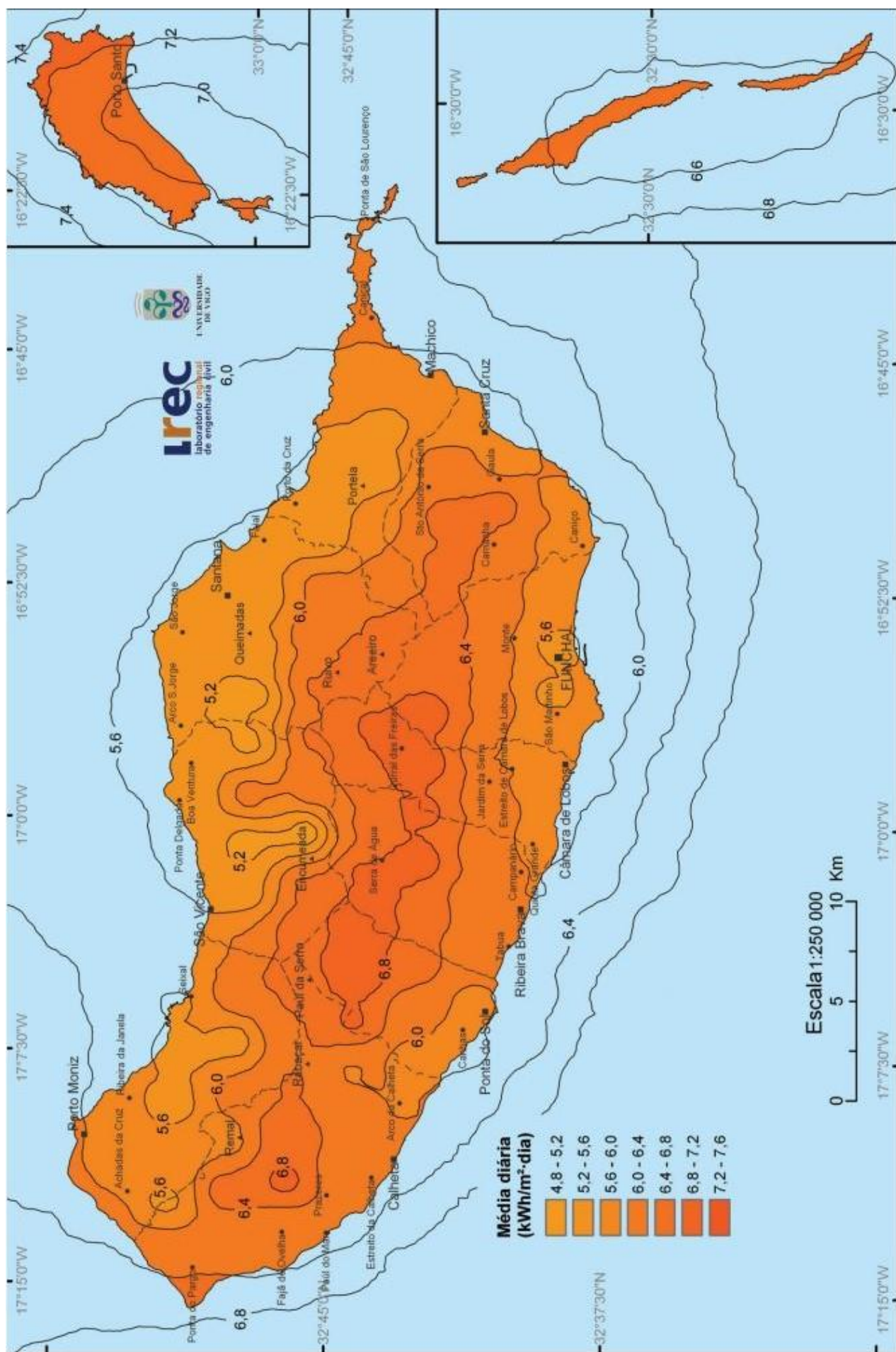
Figura 72 - Radiação Solar Total - Maio [8].
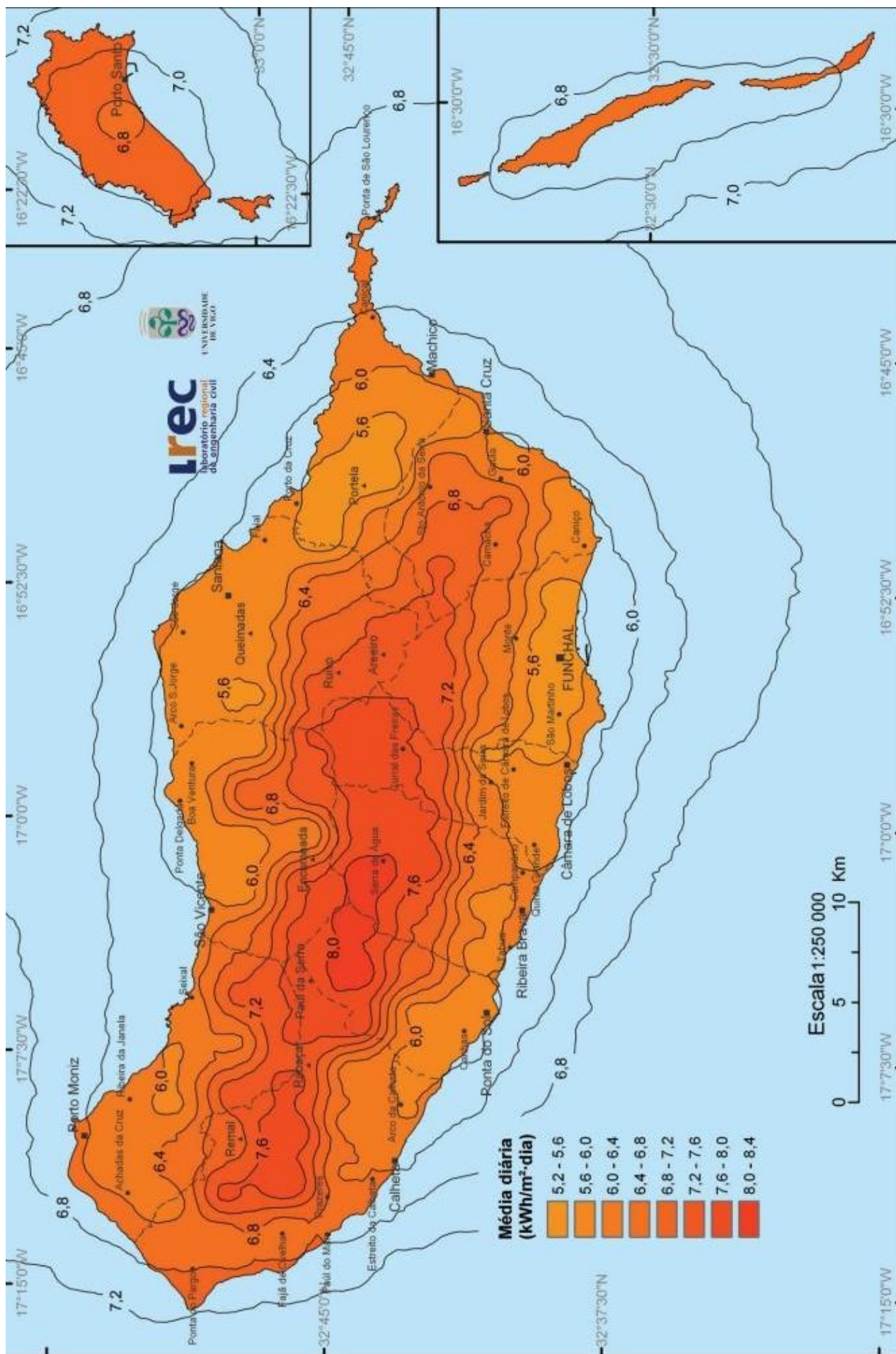
Figura 73 - Radiação Solar Total - Junho [8].
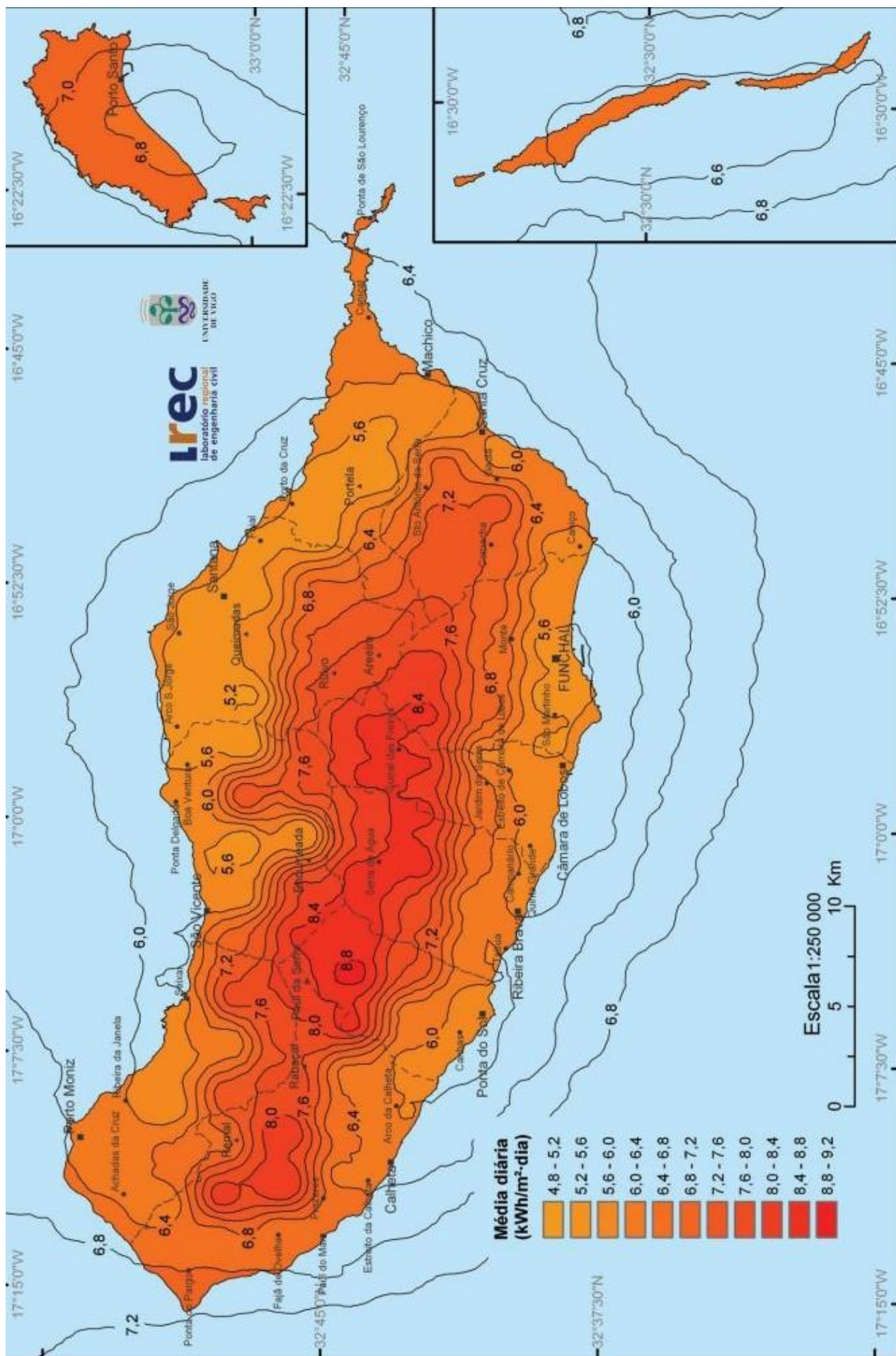
Figura 74 - Radiação Solar Total - Julho [8].

Figura 75 - Radiação Solar Total - Agosto [8].
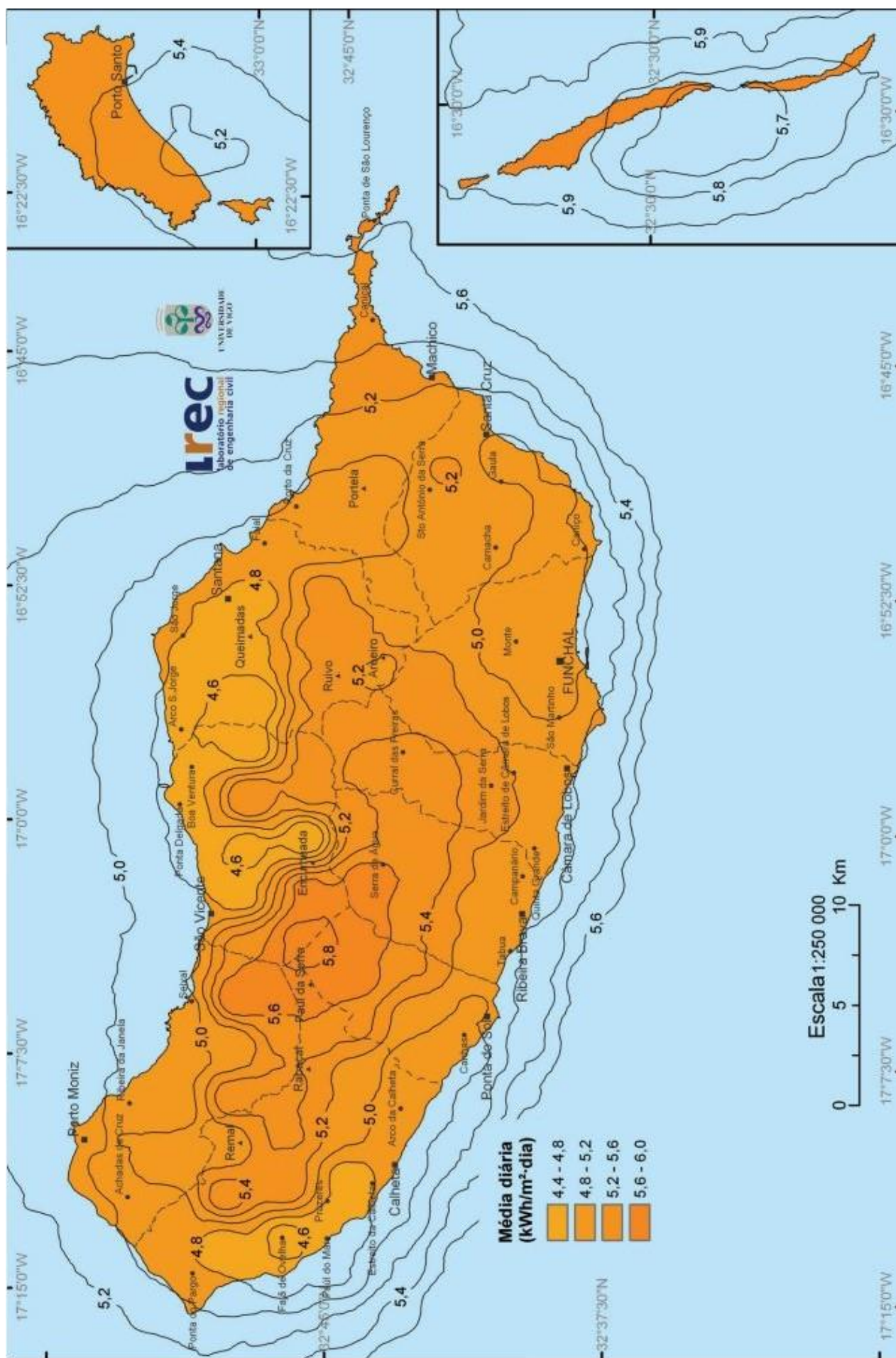
Figura 76 - Radiação Solar Total - Setembro [8].
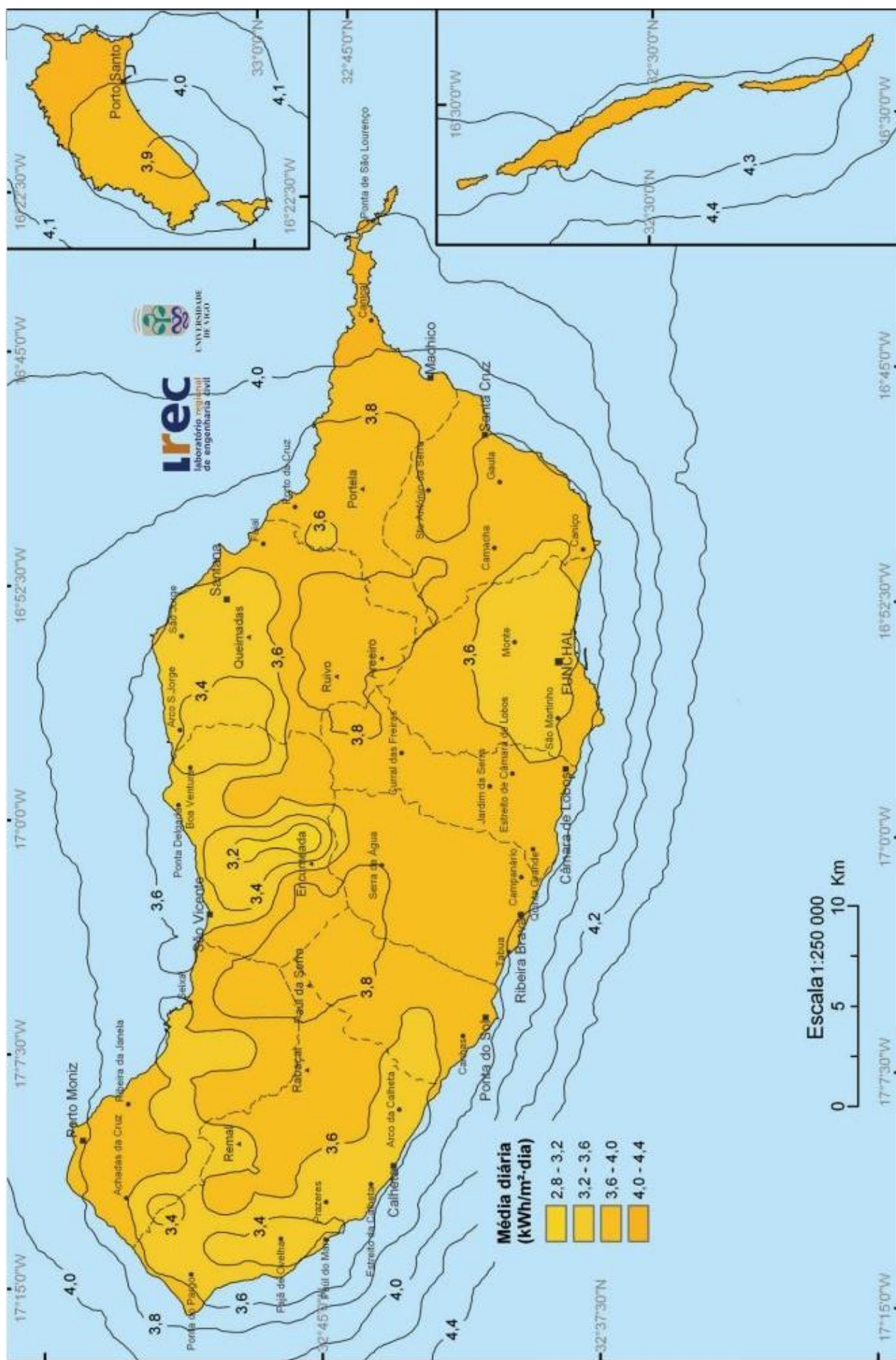
Figura 77 - Radiação Solar Total - Outubro [8].

Figura 78 - Radiação Solar Total - Novembro [8].

Figura 79 - Radiação Solar Total - Dezembro [8].

Anexo 2 – Mapas de radiação solar de Portugal Continental e Regiões Autónomas (Horizontal e Inclinada Otimamente, respetivamente), apurados pelo JRC
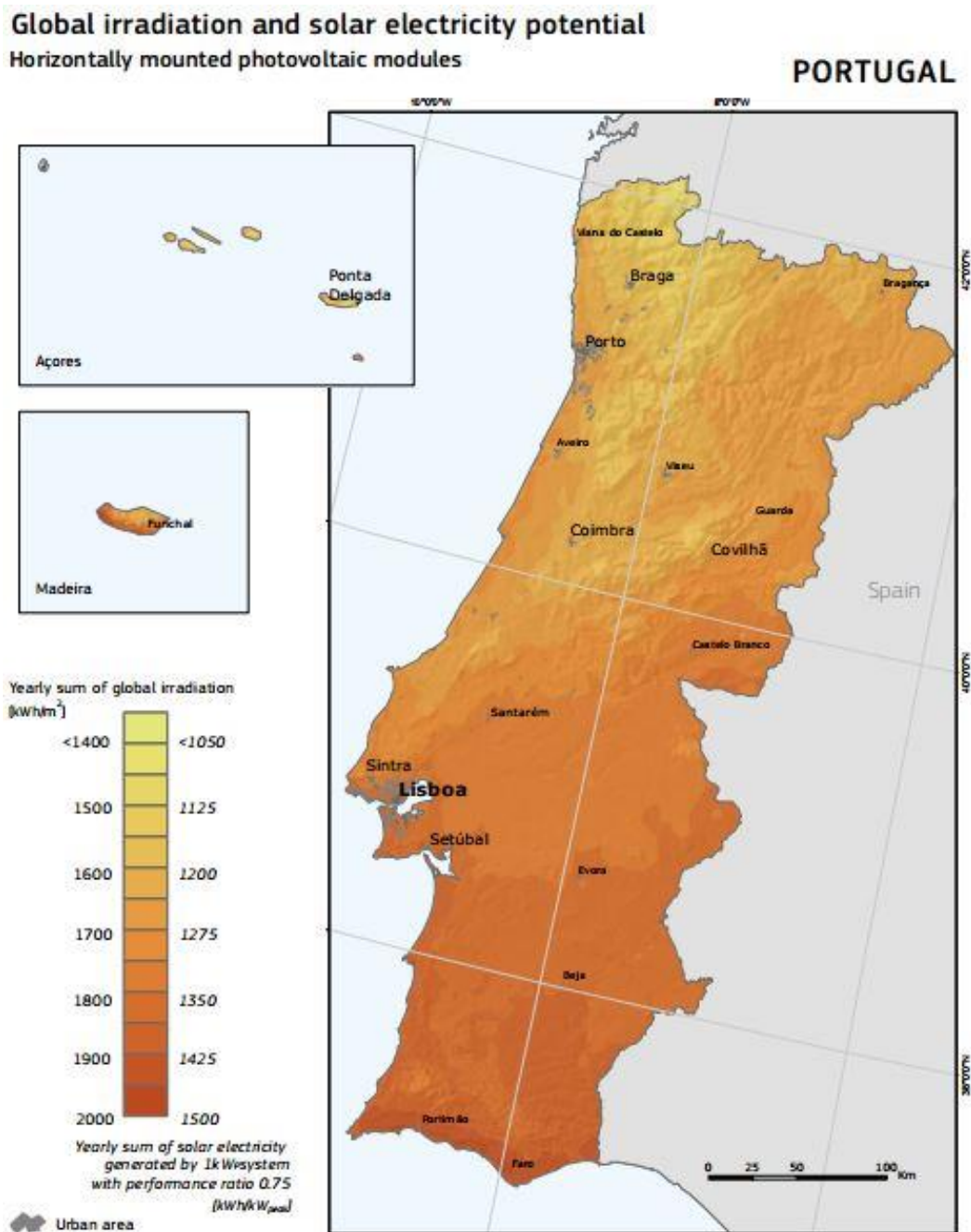
Figura 80 - Mapa de radiação solar global no plano horizontal [13].

Global irradiation and solar electricity potential
Optimally-inclined photovoltaic modules

PORTUGAL

Ponta Delgada
Açores
Funchal
Madeira
Viana do Castelo
Braga
Bragança
Porto
Aveiro
Viseu
Guarda
Coimbra
Covilhã
Spain
Castelo Branco
Santarém
Sintra
Lisboa
Setúbal
Évora
Beja
Portimão
Faro

Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]

1600	1200
1700	1275
1800	1350
1900	1425
2000	1500
>2100	>1575

Yearly sum of solar electricity generated by 1kWp system with performance ratio 0.75 [kWh/kWp]

Urban area

0 25 50 100 Km

Figura 81 - Mapa de radiação solar global no plano inclinado ótimo [13].

Anexo 3 – Tecnologias de 2ª e 3ª geração de PV

- **Tecnologias de 2ª geração – Filme Fino**

O silício cristalino é caro, sendo que, o seu custo corresponde a praticamente metade do custo final do módulo fotovoltaico, e a sua disponibilidade é limitada, existindo alguma preocupação quanto ao processo de purificação para silício de grau solar, que pode ter custos consideráveis, designadamente em termos energéticos. Com estas limitações a indústria viu-se obrigada a procurar outras alternativas mais económicas tanto ao nível dos materiais como das tecnologias de produção correspondentes.

Os novos materiais descobertos são melhores absorvedores de luz, pelo que a espessura de semicondutor pôde ser reduzida para valores da ordem das poucas unidades de mícron, ou seja, cerca de duzentas vezes inferior à das células de silício, com a correspondente redução de custos.

Estes materiais são especificamente adequados à utilização na chamada tecnologia de filme fino, nas quais se deposita o material semicondutor (ultrafino) em substratos de grande área (de metal, plástico ou vidro), e à produção em grande escala. Nesta tecnologia, os materiais mais utilizados são o Telureto de Cádmio (CdTe), com 8% do mercado, o silício amorfo (a-Si), com 5%, e o Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS) com menos de 1% [2].

As tecnologias de filme fino, designadas de 2ª geração, têm verificado um crescimento enorme nos últimos anos devido ao grande potencial de redução de despesas que apresentam, à sua grande maleabilidade e flexibilidade dos processos de fabrico.

A figura 82 apresenta duas imagens relativas a dois sistemas diferentes. A figura 82 a) mostra um exemplo de uma célula de filme fino com substrato flexível e, a figura 82 b), apresenta um sistema fotovoltaico de filme fino com substrato rígido.
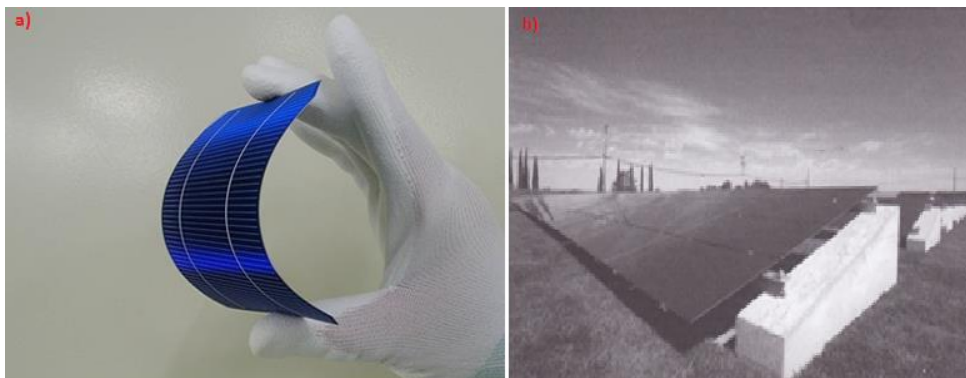
Figura 82 - Sistemas fotovoltaicos de filme fino [60] [2].

As previsões realizadas indicam que, este grande potencial de crescimento irá acentuar-se ainda mais nos anos vindouros mas, existem algumas perguntas às quais ainda não há respostas, como [2]:

- Qual o potencial das tecnologias de filme fino serem disruptivas, em relação às tecnologias de silício cristalino, que atualmente dominam o mercado, detendo cerca de 85% do mesmo?
- Se as tecnologias de filme fino forem disruptivas, qual a solução tecnológica que será capaz de o concretizar?
- Que novos desafios aparecerão à tecnologia de filme fino, à medida que a mesma evolui e entra no mercado?

A todas estas questões sem resposta concreta, somam-se algumas desvantagens competitivas, como o conhecimento ainda fraco dos materiais utilizados, ser uma tecnologia

relativamente recente e, sobretudo, o facto da eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica ser inferior à obtida com as tecnologias convencionais constituídas por silício cristalino.

Em termos tecnológicos, o mercado atual oferece várias soluções/opções de filme fino, descritas de seguida:

- ***Células de Telureto de Cádmio (CdTe)***

Este tipo de células é o mais difundido entre a tecnologia de filme fino, apresentando os melhores módulos solares comerciais, eficiências na ordem de 10%/11% e, em laboratório, atingindo os 16% de eficiência. Apesar deste tipo de células já possuir um longo caminho evolutivo, ainda encontram-se em fase de desenvolvimento e investigação.

O maior problema deste tipo de células é a conhecida toxicidade do Cádmio que, coloca em causa a sua benignidade ambiental, acrescendo o facto de o Telúrio ser um elemento particularmente raro, limitando assim a capacidade de produção em grande escala. Atualmente estão a ser desenvolvidas células com recurso a camadas de Estanato de Cádmio (Cd_2SnO_4), apresentando características de condução capazes de otimizar a potência de saída. A figura 83 ilustra um painel fotovoltaico de CdTe [2].

Figura 83 - Painel fotovoltaico de CdTe [2].

- ***Células de Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS)***

Este tipo de células constitui, presentemente, a tecnologia mais eficiente de todas as tecnologias de filme fino, atingindo rendimentos em operação comercial de cerca de 11%/13% e, em laboratório, 20% de eficiência. Estas células têm as vantagens de não serem suscetíveis a degradar-se com a exposição solar e os seus respetivos constituintes não serem tóxicos.

A principal dificuldade técnica das células CIGS está inerente à elevada complexidade da camada de absorção, formada por cinco elementos. Esta característica provoca complicações na obtenção de uma camada igual de deposição ao longo do substrato, fazendo aumentar as despesas de produção. Outro fator prejudicial para a disseminação desta tecnologia pelo mercado é a reduzida disponibilidade do Índio, cujas reservas mundiais conhecidas chegariam apenas para alguns GWp, tornando o produto final caro. A figura 84 mostra um exemplo de uma célula fotovoltaica CIGS [2].
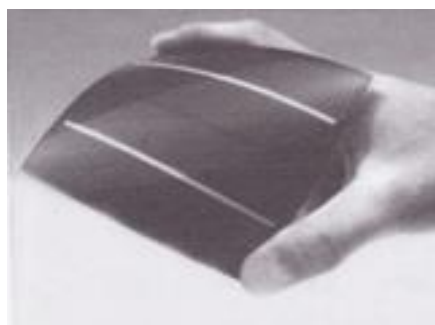
Figura 84 - Célula fotovoltaica CIGS [2].

- ***Células de Silício amorfo (a-Si)***

O silício amorfo é uma forma de silício sem estrutura cristalina, tendo defeitos estruturais que, normalmente, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas. Mas, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogénio, através de um processo designado hidrogenização, os átomos de hidrogénio combinam-se quimicamente de forma a minimizar as consequências negativas dos defeitos estruturais.

Através da tecnologia denominada *standard*, é depositado silício amorfo hidrogeneizado num substrato (usualmente de vidro mas com a possibilidade de ser outro substrato flexível) por um processo conhecido na literatura por *Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)*, a uma temperatura de cerca de 200°C. Esta tecnologia tem beneficiado da experiência obtida com a fabricação de ecrãs de cristais líquido (*LCD*), que utiliza um processo muito semelhante [2].

Porém, este tipo de células de filme fino tem algumas grandes desvantagens como, eficiência baixa (11%/12%, no máximo) e pouco potencial de crescimento; além disso, a eficiência varia ao longo da sua vida útil expetável (redução para níveis da ordem de 5%/6%, em regime equilibrado), devido às degradações sofridas por exposição à radiação solar [2].

- ***Células de Silício microcristalino (µ-Si)***

De forma a minimizar as desvantagens competitivas das células a-Si, utilizou-se como alternativa o silício microcristalino. Este é uma variante do silício amorfo, sendo a sua estrutura obtida através da diluição deste constituinte em hidrogénio, conferindo-lhe uma microestrutura híbrida, com propriedades mistas, entre o silício amorfo e o cristalino. Assim, pretende-se aproveitar esta capacidade de manter a eficiência constante de maneira a obter uma combinação da estabilidade e boa eficiência do silício cristalino com a simplicidade e baixo custo de produção do silício amorfo [2].

A fabricação envolve o processo *PECVD*, com excitação a frequências elevadas, da ordem dos MHz, o que apresenta dificuldades técnicas que têm condicionado o desenvolvimento à escala industrial. Por este motivo, a viabilidade comercial desta tecnologia parece atualmente comprometida [2]. A nível de eficiência, este tipo de células consegue atingir aproximadamente 11%.

- ***Células de Silício microamorfo (µa-Si)***

As células de silício microamorfo são formadas pela junção de células de silício microcristalino com células de silício amorfo, sendo que, estas últimas ficam colocadas na camada superior do painel (parte virada para o Sol). Esta junção é feita através de uma ligação em *tandem* (camadas alinhadas em fila única e com a mesma direção), e tem o objetivo de melhorar a utilização do espetro solar. Várias companhias têm-se interessado por este tipo de células, reportando a literatura, valores de eficiência da ordem de 11%, em regime equilibrado.

Os primeiros módulos comerciais usando esta tecnologia de células solares, estão anunciados para muito breve, sugerindo que as dificuldades encontradas inicialmente na deposição de camadas uniformes e ultrafinas (menor que 2 mícron) podem estar ultrapassadas [2].

- ***Células de Silício cristalino em vidro (CSG)***

Neste tipo de células o material constituinte não é silício, mas sim gás silano (SiH_4). Uma camada ultrafina, menor que 2 mícron, é depositada diretamente no vidro, sendo de seguida cristalizada por aquecimento. Este tipo de células está em fase de comercialização limitada, para servir de teste à aceitação por parte do mercado a este tipo de células. Esta tecnologia apresenta rendimentos de aproximadamente 8%.

- **Tecnologias de 3ª geração – tecnologias emergentes**

Há ainda um conjunto de novas tecnologias emergentes de filme fino que se encontram ainda numa fase de investigação, mas com um elevado potencial de desenvolvimento e, talvez, de inovação disruptiva. A seguir referem-se as tecnologias de 3ª geração de maior relevo e com maior potencial de desenvolvimento.

- ***Células sensibilizadas por corante***

Este tipo de células também é conhecido como células de Gratzel, são compostas por um elétrodo de Dióxido de Titânio (TiO_2), com corante, obtido a partir de um complexo metálico de Ruténio ou Osmónio, sobre um vidro coberto por Óxido de Estanho (SnO_2), dopado com Flúor, um elétrodo de Platina e um eletrólito. Com custos de produção baratos, o futuro deste tipo de tecnologia ainda é incerto, principalmente devido à dificuldade de manter o eletrólito em vácuo [2]. Recentemente conseguiu-se elevar os valores obtidos para a eficiência, para o resultado recorde de 15%. A figura 85 mostra uma célula deste género.

Figura 85 - Célula sensibilizada por corante [61].

- ***Células orgânicas***

Ainda com um desenvolvimento precoce, este tipo de tecnologia de células solares utiliza pigmentos orgânicos como dadores e recetores de eletrões e buracos, ao invés de junções p-n. Com rendimentos máximos de 7%/8% estas células têm a vantagem de utilizar materiais económicos para o seu fabrico. As desvantagens deste tipo de células é ocupação de espaço requerido para níveis de potência de saída semelhante às concorrentes, resistência, estabilidade e durabilidade (menor que 10.000 horas de vida útil). Na figura 86 está um exemplo deste tipo de células solar.
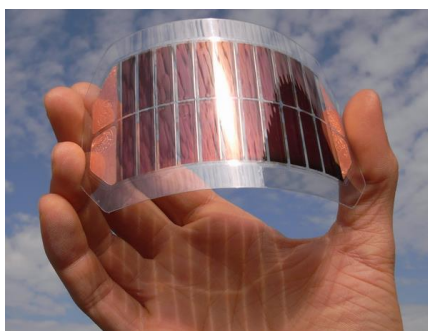
Figura 86 - Célula orgânica [61].

- ***Nanoantenas***

Este tipo de tecnologia solar encontra-se ainda em fase de investigação mas está a dar passos marcantes, tendo a perspetiva de vir revolucionar o modo como é captada a energia solar.

Com uma forma de funcionamento completamente distinta das células de camadas (sem portadores, camadas, junções, etc.), este tipo de tecnologia assenta na ideia de “sintonizar” uma antena para a frequência da radiação de infravermelho, captando a energia do Sol, durante o dia, e a radiação da Terra, ao longo da noite [2].

Para que este conceito fosse implementado, foram essenciais os desenvolvimentos da área das nanotecnologias, permitindo a deposição de camadas nanoscópicas de metal, compondo pequenas espirais com espessuras ínfimas, criando assim as nanoantenas. Estas possuem a capacidade de captar diversos comprimentos de onda da luz, de acordo com a sua dimensão. Uma célula poderá ter diversas camadas com nanoantenas de vários comprimentos, permitindo assim aumentar o espetro de radiação absorvida e a sua eficiência [2].

Com a possibilidade de fabricação em grande escala através de processos de impressão em rolos, uma eficiência de aproximadamente 80% aliada à independência do custo do silício, faz com que esta tecnologia seja promissora e provavelmente disruptiva em relação às demais tecnologias do ramo da energia solar. Atualmente, a tecnologia das nanoantenas está a tentar ultrapassar os problemas associados aos efeitos de ressonância, que podem ser destrutivos em alguns casos.

Anexo 4 – Informações sobre os FV instalados no Funchal

A tabela 32 possui todas as informações sobre as 10 instalações fotovoltaicas selecionadas para a realização do retorno do investimento em microprodução (figura 54).

Tabela 32 - Caraterísticas técnicas das instalações de microprodução na zona do Funchal.

	Instalações fotovoltaicas	Potência de cada módulo (kW)	N.º de módulos	Potência Instalada (kW)	Produção (kWh)	
					2011	2012
	MP2009010110	0,215	18	3,870	5110	4965
	MP2009012653	0,215	18	3,870	5878	5675
	MP2009009979	0,22	18	3,960	5671	5651
	MP2009012918	0,22	18	3,960	5892	5857
	MP2009009150	0,225	18	4,050	5626	5581
	MP2009009756	0,225	18	4,050	5248	5140
	MP2009007146	0,23	18	4,140	6419	6224
	MP2009009349	0,23	18	4,140	6142	6196
	MP2009010111	0,23	18	4,140	6803	6810
	MP2009011653	0,23	18	4,140	5670	5506
Média		**0,224**	**18**	**4,032**	**5846**	**5761**

É importante mencionar que, para efeitos de tratamento de dados e simulação foi utilizado 4,05 kW como valor médio de potência instalada em FV, uma vez que, em termos práticos e realistas é o valor que mais se aproxima da média verificada para as potências das instalações solares do Funchal (4,032 kW).

Anexo 5 – Esquema de ligação do sistema de autoconsumo dimensionado e respetivos componentes

5.1 Esquema de ligação do sistema de autoconsumo dimensionado
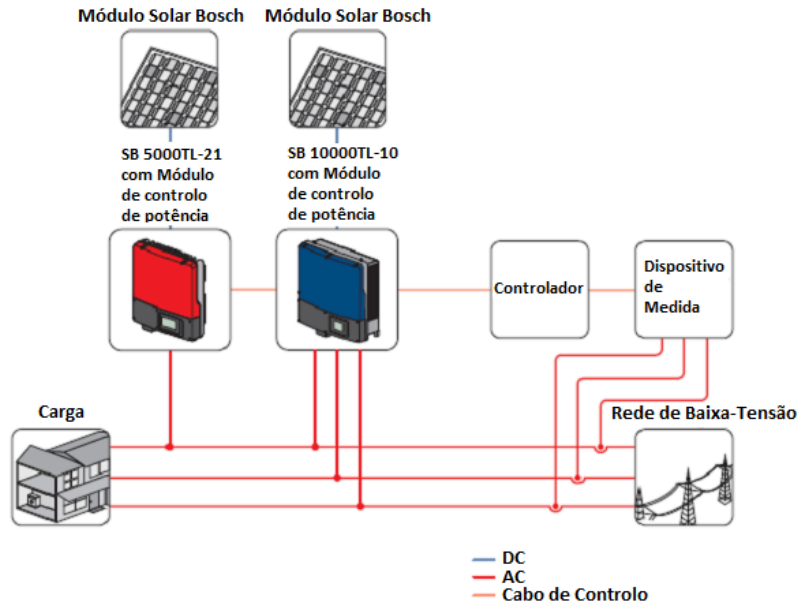
Figura 87 - Esquema de ligação elétrico projetado para o FV de 10 e 20 kW de potência instalada [63].

5.2 Painel Solar

Foram realizados estudos para identificar fornecedores que pudessem garantir certos níveis de qualidade e prazos de entrega. Como resultado destes, o módulo fotovoltaico escolhido para a configuração dos projetos de instalações fotovoltaicas para autoconsumo, foi da marca Bosch M240 (figura 88) com uma potência unitária de 240W (Monocristalino). Este módulo é aquele que, dos módulos disponíveis entre os fornecedores selecionados, oferece melhor disponibilidade para a quantidade necessária e níveis esperados.

Estes oferecem uma garantia de 25 anos de saída de potência, 10 anos de garantia de produto e, possuem a certificação TUV safety class II. As características dos mesmos podem ser visualizadas nas seguintes tabelas [64].

Tabela 33 - Componentes.

Componentes	
Tipo de Célula	Monocristalino
Número de Células	60
Célula (mm)	156
Conetor	MC4

Figura 88 - Módulo Solar Bosch M240 [65].

Tabela 34 - Características elétricas.

Características elétricas	
Potência de pico nominal (Wp)	230
Tensão à potência de pico (V_{mpp}) (V)	30
Corrente à potência de pico (I_{mpp}) (A)	8,1
Tensão em circuito aberto (V_{oc}) (V)	37,4
Corrente de curto-circuito (I_{sc}) (A)	8,6
Tensão máxima (V_{max}) (V)	1000
Coeficientes térmicos	
Coeficiente de Potência (%/°C)	-0,46
Coeficiente de Corrente (%/°C)	-0,03
Coeficiente de Tensão (%/°C)	-0,32
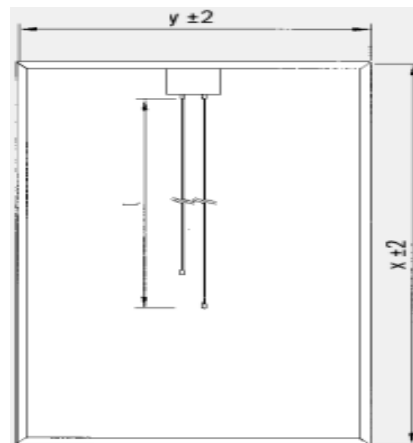
Figura 89 - Dimensões do PV Bosch M240.

Tabela 35 - Dimensões e peso.

Dimensões e Peso	
Longo (cm)	166
Largo (V_{mpp}) (cm)	99
Alto (I_{mpp}) (cm)	5
Peso (kg)	21
Área (m^2)	1,64

5.3 Inversores

Para os projetos dimensionados para autoconsumo de 10 kW e 20 kW, todas as especificações do inversor foram tomadas em conta para a configuração do número de módulos em série (para fixação do nível da tensão) e *strings* em paralelo (para fixação do nível de corrente).

Assim, os inversores selecionados foram os SMA STP 10000TL (figura 90), sendo estes uma referência no mercado e cumprem todos os requisitos de qualidade necessários para este tipo de instalação, acerca das proteções, compatibilidade magnética, etc.

Os sistemas fotovoltaicos foram planeados com 2 inversores de alta eficiência STP 10000TL e possuem uma potência nominal AC de 10000W.

Um dos fatores de escolha deste modelo de inversor foi ainda o seu elevado rendimento, o que permitirá, eventualmente, um maior valor de produção anual do sistema fotovoltaico, com garantia de produto de 5 anos, expansível a 10 anos, destacando-se assim da maioria dos restantes equipamentos da concorrência. As características dos mesmos podem ser visualizadas nas seguintes tabelas.

Tabela 36 - Características elétricas de saída.

Características elétricas de saída	
Potência nominal (W)	10.000
Potência máxima aparente AC (VA)	10.000
Corrente máxima de saída (A)	44
Desconexão da saída por razões de segurança (s)	0.2
Frequência (Hz)	50
Cos phi	1
Número de fases	3/N/PE
Tensão da rede (V)	230/400
Distorção Harmónica (THD) (%)	< 3

Figura 90 - Inversor SMA STP 10000TL [66].

Tabela 37 - Características elétricas de entrada.

Características elétricas de entrada	
Potência máxima do gerador fotovoltaico (W)	10.200
Intervalo MPP (V)	Entre 320 a 800
Tensão em vazio (V)	1.000
Corrente de entrada máxima (A)	22
Número de *strings*	5
Número de reguladores MPP	2

Tabela 38 - Características elétricas gerais.

Características elétricas gerais	
Rendimento Máximo (%)	98,1
Rendimento Europeu (%)	97,5
Consumo próprio: Standby (W)	<10
Consumo próprio: Desconexão noturna (W)	<5
Frequência do relógio (kHz)	9
Conceito de circuito	Automático, s/transformador
Vigilância da rede	Normas Europeias

Tabela 39 - Características mecânicas.

Características mecânicas	
Dimensões comprimento x largura x altura (cm)	66,5 x 69 x 26.5
Peso (kg)	59
Interruptor de CC	Integrado
Tipo de proteção	IP 54
Refrigeração	Opticool©
Emissão de ruídos (dB)	<42
Temperatura (°C)	Entre -25 a 60
Portas	RS485
Conexões	Conexões de CA e CC mediante bornes; MC4
Indicador	Display gráfico

Tabela 40 - Equipamentos de proteção.

Equipamentos de proteção
Proteção contra inversão de polaridade CC
Interruptor CC (ESS) da rede
Proteção AC contra curto-circuito
Monitorização de falta de terra
Monitorização de conexão/desconexão à rede pública segundo normas
Monitorização integrada de corrente residual em todos os pólos
Proteção contra sobretensões Classe III

5.4 Cabo de "String"

Para determinação das características deste cabo teve-se em consideração a norma de classe II de isolamento, visto o inversor ser do tipo sem transformador, e respeitar o conjunto de fatores descritos abaixo. O cabo selecionado é o radox 125, mono-condutor e com uma secção de 6 mm^2, de forma a satisfazer as condições necessárias, designadamente:

- Tensão estipulada – 1000 V CC ou 600/1000 V AC (a tensão máxima do gerador fotovoltaico é de 885,6 V CC);
- Corrente a suportar – I_Z 1.25 * I_{sc}, sendo $I_Z = I_N * f_1 * f_2 * f_3$.

5.5 Quadros Elétricos com proteções e conexões

Estes quadros são para montagem saliente ou embebida no local próprio, consoante opção do cliente, tendo rigidez mecânica suficiente para que não se verifique oscilações, aquando o funcionamento do sistema solar. Os locais de instalação não podem ter características inferiores às de IP44 e IK08, e de características da classe II. As caixas devem possuir o ligador apropriado à secção dos cabos e uma boa ligação. As mesmas contêm:

- Descarregadores de sobretensão tipo SMA II - 1 entrada;
- Fusíveis para *strings* de painéis fotovoltaicos de 60 células;
- Relé de sinal;
- Transformador de Corrente;

- Caixa de elementos;
- Proteção diferencial – AC da rede de saída do inversor
- Analisador de Rede;
- Módulo de Controlo de Potência da SMA.

5.6 Estruturas de fixação

Estas estruturas são constituídas por parafusos e porcas M10 inox A2, exclusivamente, para fixação da armação e parafusos e porcas M8 inox A2 para fixação dos painéis na armação. Devem ser respeitados os seguintes binários:

- M8 – 20 Nm;
- M10 – 45 Nm;

Estas estruturas têm perfis transversais Standard tipo 2 e Light tipo 2 (figura 91), em que a ranhura inferior serve para alojar parafusos de cabeça de martelo M10 e parafusos M10 inox A2.
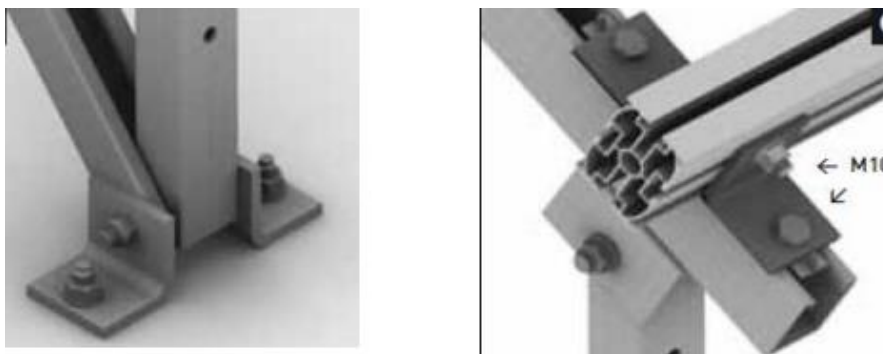
Figura 91 - Estruturas transversais Standard tipo 2 e Light tipo 2.

A estrutura final (figura 92) possuirá fixadores de fecho e intermédios para a fixação dos painéis solares nos perfis transversais.
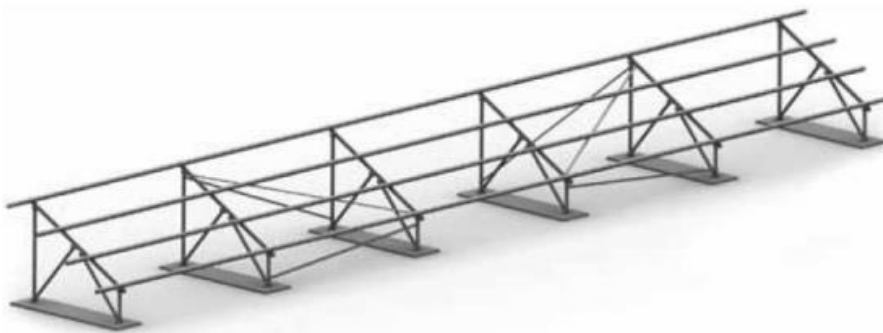
Figura 92 - Estrutura final de suporte dos PV.

5.7 Monitorização

O Sunny Beam com Bluetooth© Wireless Technology possibilita a monitorização de sistemas solares de forma económica e sem despesas de instalação – 24h por dia. Os dados dos sistemas são enviados sem cabos e representados resumidamente no visor do Sunny Beam (figura 93), sendo controlados pelo proprietário de maneira a verificar o estado do seu sistema.

Também é possível consultar os inversores através da interface Bluetooth e ainda parametrizá-los. É proporcionada uma função sonora de aviso/alarme, que informa sobre a possível perda de rendimento do sistema solar.

Figura 93 - Visor informativo wireless Sunny Beam [67].

Anexo 6 – Informações das simulações dos painéis térmicos no SolTerm

Localização, posição e envolvente do sistema

Concelho de Funchal

Coordenadas nominais: 32,7°N, 16,9°W

TRY para RCCTE/STE e SOLTERM (LNEG (2009) www.lneg.pt solterm.suporte@lneg.pt)

Obstruções do horizonte: por defeito

Orientação do painel: inclinação 27° - azimute 0°

Tabela 41 - Balanço energético mensal e anual para o caso 1.

Meses	Rad. Horizontal (kWh/m^2)	Rad. Inclinada (kWh/m^2)	Fornecido (kWh)	Carga (kWh)	Apoio (kWh)
Janeiro	59	79	1608	27848	26240
Fevereiro	76	95	2104	25180	23076
Março	114	128	2869	27820	24950
Abril	139	142	3157	26870	23713
Maio	168	163	3433	27558	24125
Junho	153	143	2680	26450	23770
Julho	179	170	3693	25952	22259
Agosto	167	168	4108	25759	21651
Setembro	125	136	3384	24971	21587
Outubro	96	114	2727	27038	24311
Novembro	64	84	1853	26526	24673
Dezembro	56	77	1531	27750	26219
Anual	**1395**	**1499**	**33147**	**319723**	**286575**

Tabela 42 - Balanço energético mensal e anual para o caso 2.

Meses	Rad. Horizontal (kWh/m^2)	Rad. Inclinada (kWh/m^2)	Fornecido (kWh)	Carga (kWh)	Apoio (kWh)
Janeiro	59	79	3476	54688	51211
Fevereiro	76	95	4507	49814	45307
Março	114	128	6150	54239	48090
Abril	139	142	6714	51668	44953
Maio	168	163	7381	50162	42781
Junho	153	143	5870	45126	39255
Julho	179	170	7940	41153	33213
Agosto	167	168	8140	165166	157026
Setembro	125	136	7165	37592	30397
Outubro	96	114	5855	42058	36203
Novembro	64	84	4054	46307	42253
Dezembro	56	77	3359	53157	49798
Anual	**1395**	**1499**	**70641**	**691129**	**620488**

Legenda:
Rad. Horizontal – energia acumulada (mensal ou anual) da radiação solar global na horizontal à superfície, por unidade de área (kWh/m2);

Rad. Inclinada – energia acumulada (mensal ou anual) da radiação solar global à face dos coletores solares, por unidade de área (kWh/m2), designadamente num plano inclinado. É de mencionar que, este valor não inclui o efeito dos modificadores de ângulo de incidência;

Fornecido – energia acumulada (mensal ou anual) que o sistema térmico dimensionado fornece para consumo (kWh). Trata-se de energia final útil, i.e. efetivamente entregue;

Carga – valor acumulado (mensal ou anual) da energia solicitada para consumo (kWh);

Apoio - energia acumulada (mensal ou anual) entregue para consumo pelo sistema de apoio ou auxiliar, para complementar a energia fornecida pelo sistema solar dimensionado (kWh). Trata-se de energia final útil; o valor de energia final útil correspondente será superior, e ainda mais o valor de energia primária.

Anexo 7 – Artigo Científico

On the current payback time for small investors in the photovoltaic systems in the Region of Madeira

Sandy Rodrigues Abreu[1], Marco Leça[1], Xiaoju Chen[2] and F. Morgado-Dias[1]
[1]Madeira Interactive Technologies Institute and Centro de Competências de Ciências Exactas e da Engenharia, Universidade da Madeira
Campus da Penteada, 9000-039 Funchal, Madeira, Portugal.
morgado@uma.pt
[2]Civil and Environmental Engineering Department, Carnegie Mellon University, 5000 Forbes Avenue, Pittsburgh, PA 15213, USA

Abstract. Following a period of strong investment in renewable energy, Portugal is now facing a huge reduction in the support for such clean energy sources, namely through the reduction of the feed-in tariffs and removal of tax incentives. The region of Madeira benefits from a very good solar exposition and has strong fossil fuel based products dependency, which make it a favorable place to invest in photovoltaic. But unfortunately these recent changes made the feed-in tariffs too low for any informed investor to put money there. Throughout this paper we analyze the payback time for these investments, we select the best regime for selling energy and forecast the future for this area of activity along with the next decisions that will be important in this area.

Keywords: Photovoltaic systems, Feed-in tariff, Payback time, Micro Production, Mini Production, Self-consumption

1 Introduction

Following a period of strong investment in renewable energy, Portugal is now facing a huge reduction in the support for such clean energy sources, namely through the reduction of the feed-in tariffs and removal of tax incentives. The scenery change has been forced by a deep financial crisis but the payback time (PT) for small investors through the photovoltaic micro production regime has been getting higher and is no longer an attractive investment, in spite of a huge reduction of the necessary investment that is now below half of the necessary amount 8 years ago.

The Region of Madeira (RoM), situated almost one thousand kilometers south-west from the mainland, benefits from a good solar exposition and has strong fossil fuel based products dependency. It is potentially an ideal location for investing in photovoltaic production for small investors.

According to the Portuguese legal framework, Photovoltaic (PV) installations can be under several different regimes: micro production (up to 3.68KW), mini production (up to 250 KW) and general regime. The first two benefits from special feed-in tariffs (mini production only up to 20KW and after that falls into a reverse auction for prices) and in the latter energy is bought at the same price the consumers pay, until a recent change described in section 2.3.

During the last decade a large number of small companies were created to deal with the great number of requests for new micro production installations. These companies have now an unattractive product to offer to their clients. In this paper we analyze this situation and propose the

most favorable regime for selling energy. We also forecast the future of this market and point the next decisions that will be important in this area.

1.1 Energy situation of RoM

In energetic terms, RoM has a high dependence on fossil fuel based products, although this has been mitigated by recent minor investments in renewable energy, specifically in the areas of photovoltaic and wind energy. This effort, though small, is commendable but is still in its infancy.

In the regional context we verify that there are many good examples of the application of renewable energy, with tremendous success in several points, especially in hydro, wind and photovoltaic energies, being these in descending order, from highest to lowest energy produced. The production of electricity comes mainly from diesel and natural gas plants, representing 74.5% of the total energy consumed, followed by 9% in hydropower, wind power is standing around 9.7%, solar energy at 3.8% and finally, energy from solid municipal waste (SMW) at 3%.

Figure 1 presents a graph of the energy situation of the RoM during the last 7 years.
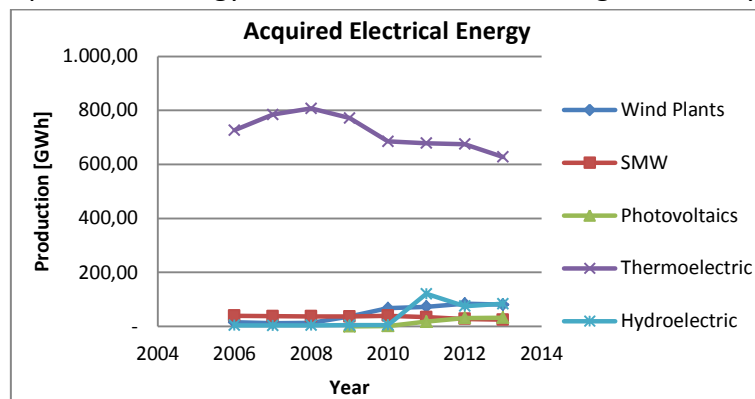
Figure 94 - Total acquired electrical energy by source in Madeira, 2013.

The electricity from solar power had an amazing growth over the past three years, with an extraordinary 200% increase in installed capacity. Already at the same level of wind energy, there has been a 120% increase in investment in this area.

1.2 Solar radiation in Madeira

Solar energy is an inexhaustible, abundant energy source on the planet. In Europe, Portugal is the country with more solar exposure, registering an annual average of approximately 8 hours/day with a reception above 1200W/m^2. The daily solar energy that reaches Portugal is on average 430000 GWh, which is equivalent to the energy the country consumes in approximately 1000 days [1] [2].

For the study of global radiation of RoM, we used data from various meteorological stations, in particular the Institute of Meteorology (IM), the Regional Laboratory of Civil Engineering (LREC), NASA Surface Meteorology and Solar Energy and World Meteorological Organization (WMO) [3]. Figure 2 shows a graph of the monthly variation of the daily solar radiation average, from 2002 to 2005.
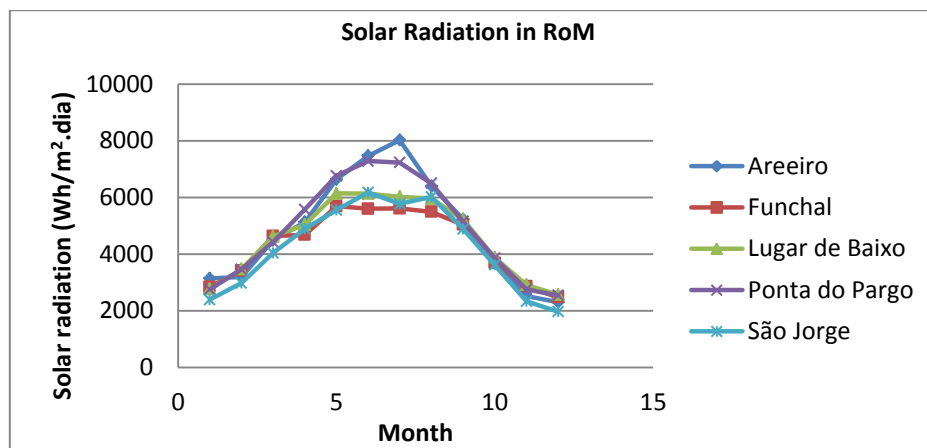
Figure 95 – Monthly variation of daily average solar radiation of RoM [4].

From figure 2, it can be concluded that the highest annual mean values were recorded in Areeiro (4873 Wh/m^2/day), followed closely by Ponta do Pargo (4868 Wh/m^2/day) in Calheta. The highest values recorded for the monthly average solar radiation, were for the months of June and July for the Areeiro and Ponta do Pargo stations. This period corresponds to the beginning of the summer season. The maximum monthly value was registered in July (8023 Wh/m^2/day).
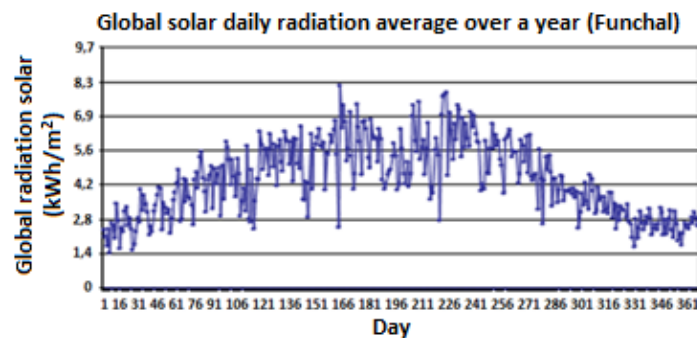
Figure 96 – Average daily solar radiation through the year for Funchal [5].

Figure 3 shows the daily average of solar radiation for Funchal over a period of five years (1999-2003) [5]. Through the data of NASA Surface Meteorology and Solar Energy System, the average measured values for monthly solar radiation on the horizontal plane was 5.63 kWh/m^2/day and the number of hours of sunshine for Madeira are around 2600 hours/year. These values are based on data prior to March 2008.

Figure 4 shows the radiation map of Madeira, Porto Santo and Desertas islands.
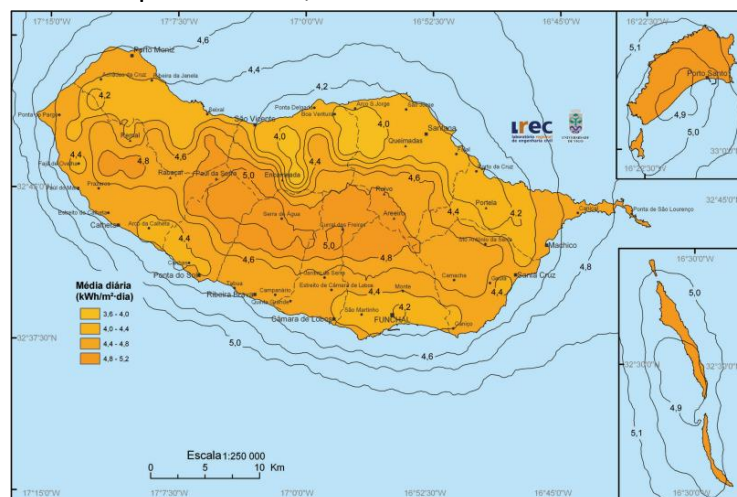
Figure 97 – Solar radiation map RoM (Vázquez et al, 2008).

Considering figures 2-4, it can be concluded that Madeira has very favorable conditions for the installation of photovoltaic panels as has been happening in the last decade.

2 Legislative framework

For small investors currently there are two regimes of selling the energy to the local electrical energy company: Micro production (McP) and Mini production (MnP).
These regimes have changed over time both in terms of feed-in tariffs and regulation. A short oversight is given in the next section.

2.1 Micro production regime

The McP regime has an upper limit of 3.68 KW of installed power, provided that the installed power is less than half of the hired from the electrical company.

Reviewing the prices since this regime was created, in 2008 the feed-in tariff was 0.65 €/kWh for the first 5 years. After that, for the next 5 years, the tariff is reduced annually, according to the ordinance definition to approximately 77 % of the value of previous year's tariff. Afterwards, the paid value goes down to the value of the cost per kWh paid by the consumers (general regime) [6]. At that time, in 2008, the cost of each kWh consumed was around 0.11 €.
In 2010, the buying regime is composed of a contract with duration of 15 years divided into two periods, the initial with 8 years and the subsequent of 7. At the end the producer is forced to join general regime where energy is bought at the same price the local company sells the energy to consumers [7]. The feed-in tariff is 0.40 €/kWh for the first period and 0.24 €/kWh for the second period, and the value of both rates is decreased by 0.02 €/kWh a year for new installations [7].
For 2014 the new values defined by government ordinance are 0.066 €/kWh for the first 8 years and 0.145 €/kWh for the remaining 7 years.

2.2 Mini production regime

These facilities produce electricity from renewable resources, based on a single production technology (e.g. wind or PV) and their maximum power supply is 250 kW, provided that the installed power is less than half of the hired from the electrical company. This type of scheme has originally been launched in 2011, with a 15 year contract with a fixed rate of 0.25 €/kWh produced, with its value reduced annually by 7% [9]. Nowadays (2014), the reference tariff for MnP is 0.106 €/kWh with feed-in tariff and 0.142 €/kWh for the general regime.

2.3 General regime for micro production

The general regime was characterized by energy being bought at the same price consumers pay, but in 2013 a new tariff was introduced according to the following equation:

$$\mathrm{Re}\, m_m = W_m \times P_{ref} \times \frac{IPC_{n-1}}{IPC_{ref}} \qquad (1)$$

Where Rem_m is the remuneration of the month m(€), Wm is the energy produced in month m(kWh), Pref is the value of the share of energy from simple rate between 2.3 and 20.7 kVA applied in the year 2012 to the consumer; IPC_{ref} is the index of prices at the consumer, excluding housing, for the month of December 2011 (published by the National Statistics Institute), and IPC_{N-1} is the same index for the month of December of the year n-1 [8]. Currently the values for this regime are 0.142€/KWh.

3 Price of Energy

As can be seen from the previous section the values of the feed-in tariffs have been changing over time. Also the prices for energy at the consumer level have been increasing based on inflation and the costs to produce energy, but were also subjected to changes in taxes, namely a change in VAT value. The VAT value was initially of 4% (2008) and was increased to 16% (2011) and is now of 22% (since 2013), but since these values were changed during fiscal years the average value in 2011 was 7% and in 2012 20.5%.

Figure 5 compares these values, considering the prices of energy at the consumer level under the Low Voltage Normal regime (BTN) up to 20.7 kVA, with bi-hourly rate, which is the most common contractual arrangement in RoM, including taxes.
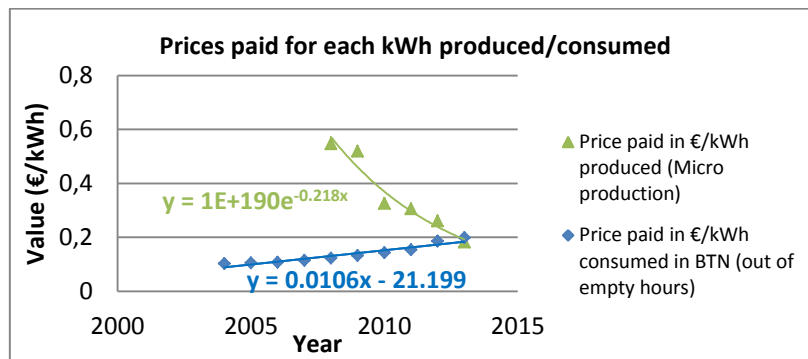
Figure 98 – Prices paid for each kWh produced in micro production and prices paid for each kWh consumed in the public network.

Analyzing this graph it can be seen that since 2010, the average value per kWh produced with McP feed-in tariff decreased significantly (from 0.547 €/kWh to 0.182 €/kWh, considering the average values along the 15 year contracts), continuing a descending trend that is approximated by $y = 1E+ 190e^{-0.218x}$.

In 2013, the amount paid for each kWh consumed exceeded the value received for each kWh produced under the McP feed-in tariff. This is a new situation where it just started to compensate to produce energy for self-consumption, instead of applying to obtain a feed-in tariff.

Figure 6 shows the feed-in value paid for each kWh in MnP and the amount paid for each kWh consumed (including taxes) during peak and full hours, under the Special Low Voltage regime (BTE) exceeding 41.4 kW, with tetra-hourly rate, which is the most common contractual arrangement in RoM for public buildings.

The values used for figure 6 were approximated by straight lines: the price paid for each kWh produced in MnP regime (y = 0.1579) and for each kWh consumed during peak hours (y = 0.0082x – 16.422) intersected in the year 2012, i.e., from this date on it compensates to consume the energy produced by the photovoltaic system for self-consumption rather than to sell it to the local energy company, since the amount received per kWh produced is lower than the price paid for each kWh consumed.
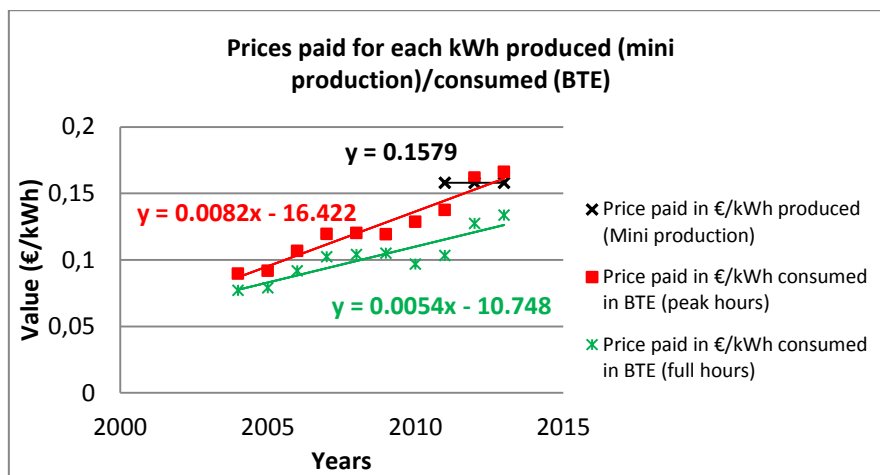
Figure 99 - Prices paid for each kWh produced in mini production and prices paid for each kWh consumed in public network.

With the current increasing trend in the price paid for each kWh consumed at full hours (y = 0.0054 x – 10.748) and the stable value paid for each kWh in MnP, it is expected that in late 2018 the former will exceed the latter.
Also note that, the amount paid for each kWh consumed in Portugal, is 13.6% higher than the average EU price and with a further increase of 2.8% proposed by the Energy Services Regulatory Authority (ERSE), added on January 1st, 2014 [10] [11].

4 Cost of photovoltaic installations in RoM

This section analyses the prices of photovoltaic installations under the McP regime in RoM. This type of installation was selected because it was the first to be regulated, and prices could be obtained from several companies. This is a regional analysis since the prices of solar modules vary by country and region in which they are acquired. The objective is not only to calculate the PT but to predict trends for future prices of these installations. The prices used are for a maximum output power of 3.68 kW, as defined in the legislation but the installing companies found out that to achieve a better payback time it would compensate to install a higher power so on average these installations are of 4.05 kW. The prices shown in figure 7 include VAT.

Since 2007 until early 2013, with the market stimulated by the presence of various manufacturers of solar cells, competition between companies has increased considerably, causing a steady decline of about 15 % per year in the prices. From mid-2013 to date, there has been a small slowdown on this decrease of prices, anticipating future price stabilization.
Nowadays, a PV installation of this size costs around 10500€. It can be seen that there is a steady fall in prices of PV installations. To characterize this behavior we have chosen an exponential function with a negative exponent. Notice that there is not enough data to build a detailed model, but this function will be much more appropriate for the behavior that can be expected in this situation. Analyzing the function of the trend line ($y = 2E{+}155e^{-0.173x}$) it is observed that in the short term (≈ 4 years), will reach up the minimum value of 5000€, from which the price of the PV installations will remain roughly stable.
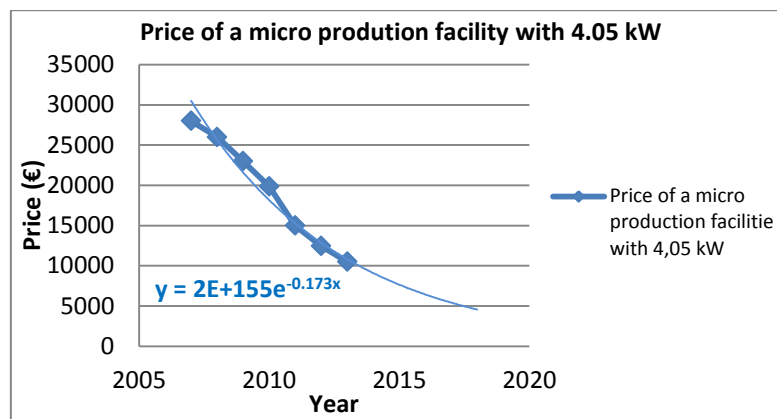
Figure 100 - Historic of prices of micro productions facilities with 4.05 kW of installed power.

5 Payback time

The graph in Figure 8 represents the number of years necessary for PT to be reached for a McP plant with an installed capacity of 4.05 kW located in Funchal, under different energy buying regimes. The value of installed capacity was calculated using the average installed power of micro production in the Funchal area. From these installations we have selected a set of 10 with available data and no failures over 2 years to calculate an average annual production of approximately 5800 kWh. These values were used in the calculations that follow.
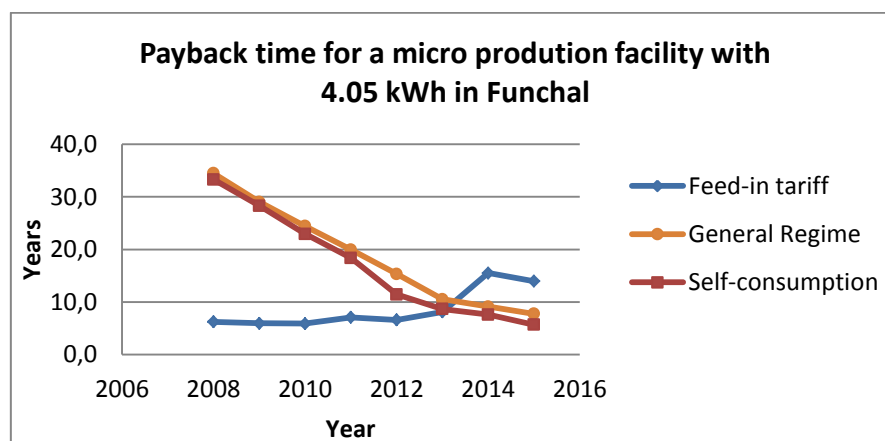
Figure 101 - Comparison between different types of regimes.

PT is a key issue to attract investment in this area. As can be seen from figure 8 the initial feed-in tariffs were designed so that this solution is commercially attractive with a PT around 6 years. Gradually these feed-in tariffs got worst and even though the installation prices reduced a lot, the PT is now over 10 years.

At the same time the energy prices for consumers increased an astonishing 209.3% over the last ten years and also had to face a VAT increase from 4% to 22%. As a result it is now more attractive for investors the use of energy for self-consumption or to go to the general regime than to apply for the feed-in tariffs. It should be noted that the self-consumption always had better PT than the general regime. Nevertheless self-consumption requires that there is enough consumption all the time to use the energy produced which will not be the case for most of the households.

It is anticipated that the future trend regarding the PT for the feed-in tariffs will be increasing, thus favoring the general regime and self-consumption.

One should note that these conclusions only apply to McP facilities, since, for MnP a different formula is applied. Moreover, the forecast for the price of electricity was determined using the average value of the index of prices at the consumer from the previous years.

6 Conclusion

From the average annual solar radiation map, we can say that Madeira has very favorable general conditions for using this resource since, in general, values above 4kWh/m^2/day are attractive for investment in PV or even heat based systems. It was shown that the areas with higher annual average solar radiation are Areeiro and Calheta. It can be stated that in most of RoM (exceeding 75% of the area), solar energy is an endogenous renewable energy resource with great interest in exploration.

The price of PV installations decreased 59.6 % over the last 5 years and the price paid to the local company per kWh consumed rose approximately 186 % in BTE scheme and 209.3 % in the BTN regime in the past 10 years.
The cost of McP facilities has decreased in the last eight years, to the current values near 10,500€ and it is expected that it will stabilize at values close to 5,000€ in 2018, if the verified trend continues.
From the analysis of the different PV production regimes, it was found that currently they are not very attractive to investors, especially the McP. This is because the PT is high, between 9-10 years and, especially, the price paid per kWh produced is relatively low and less than the amount paid for each kWh consumed.
To change this situation and make it appealing again, the average price paid per kWh produced should be greater or equal to 0.275€, in order to reduce the PT to less than 6 years, as seen in 2008. If we consider a continuous decrease in the cost of PV, the PT will decrease, making the regime more attractive.
However, with the progressive increase of energy prices (BTN clients) and considering the past downwards trend of installation costs for McP, we estimate that, in 2016, the PT will be less than 6 years.
Currently, the most attractive regime is the self-consumption though it needs the associated electrical installation to be able to use the energy produced. An interesting alternative could come from the expected legislation for this regime if it contemplates measuring production and consumption using the prices for consumers.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Portuguese Foundation for Science and Technology for their support through project PEst-OE/EEI/LA0009/2011.

The authors would also like to acknowledge the regional renewable energy companies in particular Intelsol and AMV-renewables, and LREC, Dr. Carlos Magro for their support in developing this article.

References

1. Suave Clima, http://www.suaveclima.pt/ficheiros/galeria_92_1.pdf, accessed 12/07/2013
2. Castro, Rui. “Uma introdução às energias renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica”. Lisboa, IST Press, 2011

3. NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data, https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=32&lon=16&submit=Submit, accessed 12/07/2013
4. Magro, Carlos; Vásquez, Manuel; Belmonte, Pablo; Navarro, José e Cerqueira, Maria, "Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira". Funchal, LREC, 2008
5. Ervilha, Ana e Pereira, José, "Avaliação do Potencial Energético Solar na Região Autónoma da Madeira". ERAMAC – Maximização da Penetração das Energias Renováveis e Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia; e AREAM – Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira, Funchal, 2005
6. Ordinance n.º 363/2007, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, consultado a 12/07/2013
7. Ordinance n.º 118-A/2010, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, accessed 12/07/2013
8. Ordinance n.º 25/2013, http://www.edpsu.pt/pt/PRE/Microproducao/RegulamentaoDocs/Decreto-Lei%2025_2013.pdf, accessed 12/07/2013
9. Ordinance n.º 34/2011, http://www.dre.pt/pdf1s/2011/03/04700/0131601325.pdf, accessed 12/07/2013
10. Rosa, Eugénio, "Preços da Energia em Portugal", www.eugeniorosa.com/Sites/eugeniorosa.com/Documentos/2010/41-2010-Preço-energia-Portugal-muito superior-UE27.pdf, accessed 12/07/2013
11. "Aumento aprovado: Eletricidade vai subir 2,8% em 2014", Economia - DN, http://www.dn.pt/inicio/economia/interior.aspx?content_id=3587239&seccao=Dinheiro+Vivo, accessed 13/02/2013